

Fachhochschule Bielefeld

Labor für Hydromechanik und Wasserbau

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Artilleriestr. 09 D - 32427 Minden



Schlussbericht über das Forschungsprojekt

“Bemessung wellenbelasteter Hohldeckwerke“

- BMBF - Förderkennzeichen: 1701098 -

August 2001

Förderer:

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Vorhabenbezeichnung:

“Bemessungsgrundlagen wellenbelasteter Hohldeckwerke“

Zuordnung zum FuE-Programm:

Programm zur Förderung anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung an Fachhochschulen (aFuE)

Förderkennzeichen: FKZ: 1701098

Antragsteller:

Fachhochschule Bielefeld

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Bewilligungszeitraum: 01.09.1998 bis zum 29.02.2000

Bewilligte Zuwendung als nicht rückzahlbarer Zuschuss DM 199.951,00

In Anspruch genommen: DM 197.121,69

Projektträger:

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

“Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Hauptgeschäftsstelle PT-aFuE

Bayerthalgürtel 23

50968 Köln.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Dießelhorststr. 01

38116 Braunschweig

e-Mail: buesching@hollow-cubes.de

Tel.: +49531 2512004, Fax: +49531 2512008

Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Wolfgang Thienelt

Vorausgegangener Bericht: Zwischenbericht zum 30.04.1999

Vorbemerkung:

Da die Besonderheiten über Hohldeckwerke beim deutschen Fachpublikum bisher nur wenig bekannt geworden sind, ist eine Erläuterung des **Wirkungsprinzips von Hohldeckwerken** an den Anfang des Berichtes gestellt. Die Ergebnisse der eigentlichen vom BMBF **geförderten Untersuchungen zur Bauwerksstabilität** sind durch Ergebnisse der bis dahin ausschließlich durchgeführten **Untersuchungen zur hydraulischen Effektivität von Hohldeckwerken** ergänzt dargestellt.

Inhaltsübersicht

	Seite
0. Übersicht und Ausblick	04
1. Problemstellung / Veranlassung	05
2. Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Hohldeckwerken	09
3 Ausführungsformen für unterschiedlich geneigte Böschungsbauwerke.	11
3.1 Großformatige Hohlwürfel mit einem Steg an einer Würfelkante	11
3.2 Hollow Cubes als einlagige Böschungsabdeckung	13
4. Modellaufbau und Messtechniken	15
5. Untersuchungsmethode zur Bauwerksstabilität	22
6. Untersuchungsergebnisse für Hollow Cubes an Böschungen $1:n \leq 1:2,5$	29
6.1 Energie partiell stehender Wellenkomponenten	29
6.2 Energie brechender Wellen an einer Böschung $1:n = 1:2,5$	34
6.3 Böschungsbewegungen	36
6.3.1 Böschungsneigung $1:n = 1:1,5$	36
6.3.2 Böschungsneigung $1:n = 1:2,0$	37
6.3.3 Böschungsneigung $1:n = 1:2,5$	38
7. Schrifttum	40
8. Bilddokumente	42

Braunschweig, 27.August 2001

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

0. Übersicht und Ausblick

Durchströmbare Böschungsstrukturen sind im Jahre 1992 erstmals beim Bau eines Wellenbrechers an der Einfahrt zum Hafen Baltrum/Nordsee verwendet worden, vergl. Abb.01. Unter der Förderung des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, vertreten durch das Niedersächsische Hafenamt Norden befinden sie sich nunmehr im 10ten Jahr ihrer Erprobung und haben seitdem mehr als 40 Sturmtiden mit Wasserständen $\geq M_{Thw} + 1,5m$ schadlos überstanden. Bei dem betreffenden Testbauwerk wird auf Grund seiner besonderen Hohlstruktur die Wechselwirkung Welle – Bauwerk derart beeinflusst, dass deutlich geringere Wellenlasten auf das Bauwerk ausgeübt werden als bei einem herkömmlichen Bauwerk dieser Art.

An der FH Bielefeld durchgeführte Modelluntersuchungen im Maßstab 1: 5 hatten die folgenden Vorteile gegenüber einer quasi glatten Böschungsstruktur ergeben:

- Die Energie der am Bauwerk brechenden Wellen ist bis zu rd. 40% reduziert
- Die Energie der Waschbewegung (Wellenauflauf / Wellerücklauf) gebrochener Wellen ist bis zu rd. 50% reduziert
- Da der Sturzbrecher in seiner ausgeprägten Form hier *nicht* auftritt, tendiert die Wahrscheinlichkeit von Druckschlägen gegen Null
- Verstärkter wasserseitiger Lufteintrag begünstigt die biologischen Abbauprozesse in Ufernähe.

Durch den langjährigen Naturversuch kann nicht nur die dauerhafte Stabilität des 1:3 geneigten Böschungsbauwerks als bestätigt gelten, sondern zugleich auch dessen hydraulische Effektivität, für die als Indiz auch die tatsächlich *unterbliebene* Einsandung gelten kann [01].

Das Ziel des hier dokumentierten Forschungsvorhabens bestand insbesondere darin, die *Lagestabilität* von Hohlformkörpern auch an *steileren* Böschungen zu untersuchen. Bei der Gestaltung der hierfür zu verwendenden Hohlformkörper wurden zusätzlich Grundsätze einer *wirtschaftlichen Produktion* und *praktischer Einbaumethoden* sowie *ökologische Aspekte* berücksichtigt.

Die entwickelte Grundform eines Hohlwürfels (Hollow Cube) mit Eckausnehmungen erfüllt alle genannten Anforderungen. Bewegungen aus Sackungen und Setzungen des Kernbodenmaterial hatten bei allen untersuchten Böschungen nur geringfügige Relativverschiebungen der Einzelblöcke zur Folge, sodass die Verbundwirkung in der Deckwerksoberfläche in allen Fällen gewahrt bleibt.

Insbesondere wurden *keine* resultierende Verschiebungen in Richtung der wasserseitigen Deckwerksoberfläche beobachtet. Bei künftigen Untersuchungen bzw. Anwendungen kann demnach im Sinne der Optimierung der hydraulischen Effektivität und der weiteren Materialeinsparung eine weitere Verringerung des Massivanteils der Hohlformkörper in Betracht gezogen werden.

1. Problemstellung / Veranlassung



Abb.01: Durchströmbares Böschungsdeckwerk der Neigung 1:n = 1:3, Flächengewicht 5 kN/m²; Baltrum 1992

Böschungsstrukturen, die hauptsächlich durch brechende Meereswellen belastet werden, zählen zu Recht zu den häufigsten Ufer- und Küstenschutzkonstruktionen, da im Vergleich zu Bauwerken mit vertikaler Wand bereits allein durch die Geometrie einer geneigten Wand die Wellenreflexion vermindert wird, - dies umso mehr je flacher und rauer die Oberfläche gestaltet ist.

Der Grad der Reflexion ist aber ausschlaggebend für die sich am Bauwerk ausbildende Brecherhöhe, die ihrerseits alle wesentlichen Mechanismen des Bauwerksversagens bestimmt:

Die Brecherhöhe ist die entscheidende Größe bei Schäden infolge von quasi-hydrostatischen Druckspannungsunterschieden an den Außen- und Innenseiten von Deckschichten, bei Druckschlagphänomenen, infolge der Waschbewegung gebrochener Wellen (Wellenauflauf / Wellenrücklauf), des Wellenüberlaufes etc.. Zur dauerhaften Aufrechterhaltung der Schutzfunktion von Böschungsdeckwerken ist demnach deren Unterhaltung eine ständig zu erfüllende Aufgabe und die Anpassung der Bauwerke an veränderte Randbedingungen ist unerlässlich.

Konnte lange Zeit die Anpassung an angewachsene Schutzbedürfnisse darin bestehen, Bauwerke lediglich zu erhöhen und seeseitige Böschungen mit geringeren seeseitigen Neigungen auszustatten, ist ein derartiges Vorgehen heute oft in Frage gestellt.

Einerseits darf oft wegen mangelhafter Gründungsverhältnisse das Bauwerks-gewicht nicht weiter erhöht werden und andererseits steht bei dem bereits er-reichten Maß der Küstenbesiedelung der Raum für die Anordnung hinreichend flach geneigter Böschungen gar nicht mehr zur Verfügung.

Zwar sind derartige baugrundliche und geometrische Beschränkungen als Pla-nungshindernisse bereits hinreichend gravierend. Heute muss aber die Be-gründung neuer Bauformen für hochbelastete Küstenschutzbauwerke darüber hinaus auch die weltweit vorhergesagten steigenden Wasserstände und die höhere Auftretenswahrscheinlichkeit von Sturmfluten als Lastgrößen einbezie-hen.

Durch die Anordnung *steilerer* Böschungen können raum- und massen-sparende (leichtere) Lösungen aber nur dann realisiert werden, wenn zugleich auch wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der Reflexion und des Wellenauf-laufes ergriffen werden können.

Aber auch bei bereits vorhandenen hinreichend standfesten Wasserbastruk-turen kann unter dem Gesichtspunkt der Kosteneinsparung eine örtlich begrenz-te Nachrüstung zur Wellendämpfung nur in Betracht gezogen werden, wenn diese denn tatsächlich ihren Zweck erfüllt.

Im Hinblick auf die oben skizzierten Anforderungen an eine effektive wellenbe-lastete Böschungsstruktur hat der Verfasser 1989 [01], [02] erstmals auf den Wechselwirkungsprozess zwischen der oberflächennahen Wasserteilchenki-nematik partiell stehender Wellen und derjenigen der Waschbewegung (Wel-lenauflauf – Wellenrücklauf) vorausgegangener Wellen, vergl. Abb.02, beson-ders hingewiesen.

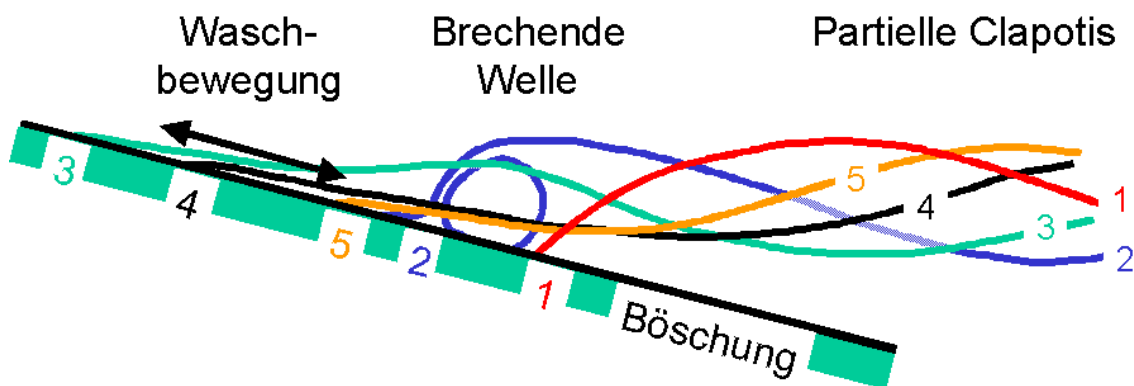


Abb.02: Phasen 1, 2, 3, 4, 5, 1, 2, 3...des Wellenbrechens an einer ebenen Bö-schung

Demnach kann die Gesamtbewegung auch als diejenige eines Koppelschwing-systems mit einer Anzahl von Freiheitsgraden (in Analogie zur elastischen Ket-te) angesehen werden: Während seewärts der Brecherzone die Teilchenbewe-gungen überall im Strömungsfeld der partiellen Clapotis (bzw. derer Kompo-

nenten [09]) elliptisch verlaufen und somit örtlich jeweils als zwei senkrecht zueinander verlaufende Schwingbewegungen definiert werden können, dominiert landwärts der Brecherzone etwa nur der eine durch die Böschungsneigung gegebene Freiheitsgrad der Waschbewegung. Dabei ist die Qualität der Kopplung – lose oder fest – im Bereich der Brecherzone durch die Art des Brechers bestimmt.

Bekanntlich sind Koppelschwingungen allgemein dadurch gekennzeichnet, dass eine vorgegebene Beeinflussung eines ihrer Freiheitsgrade immer Rückwirkungen auf die übrigen Freiheitsgrade des Gesamtsystems hat. Dies kann etwa an dem einfachen Beispiel einer Kinderschaukel demonstriert werden:

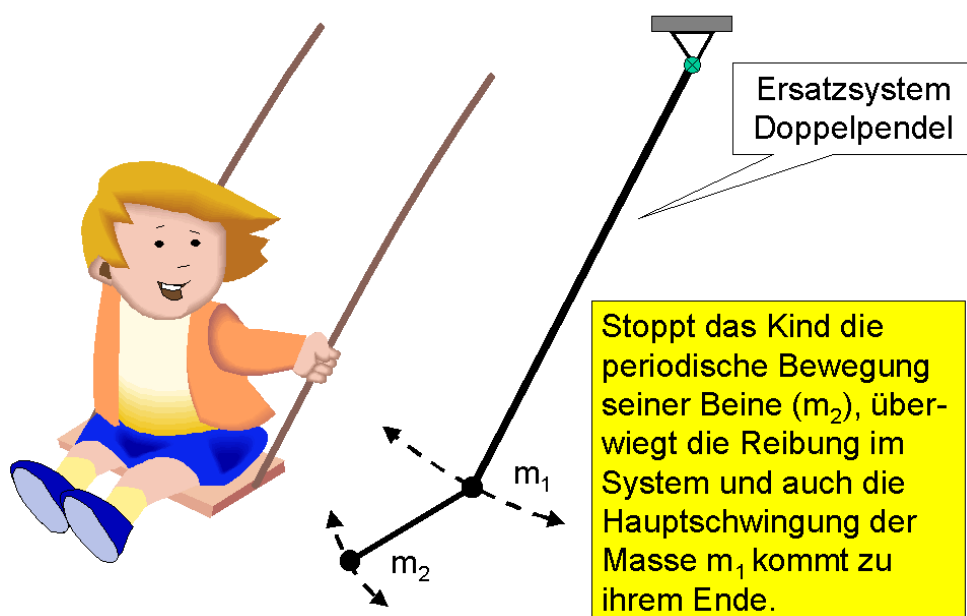


Abb.03: Koppelschwingung mit zwei Freiheitsgraden

Nach Abb. 03 sei das auf der Schaukel sitzende Kind als Doppelpendel genähert. Allgemein bekannt ist hier, dass das Kind die Hauptschwingung durch die Bewegung der Beine steuern kann.

Analog basiert beim Brandungsprozess der Vorschlag darauf, den Freiheitsgrad der Waschbewegung zu beeinflussen, um reduzierte Ausschläge bei den brechenden Wellen, d.h. kleinere Brecher, zu erzwingen. In diesem Sinne ist eine relativ weitgehende Modifizierung der Waschbewegung erforderlich, die über die Anordnung einfacher Rauheitselemente hinausgeht. Eine solche wird im vorliegenden Falle dadurch erreicht, dass zumindest ein Teil des Rücklaufwassers unterhalb der Böschungsoberfläche seewärts zurückgeleitet wird, vergl. Abb. 04. Insbesondere erlaubt das dann an der Leeseite der brechenden Welle fehlende Wasser (des Rücklaufes der vorangegangenen Welle) nur die Ausbildung einer entsprechend geringeren Brecherhöhe und eines veränderten Brechertyps.

Hohldeckwerk Baltrum:

Querschnitt im Bereich
des Böschungsfußes

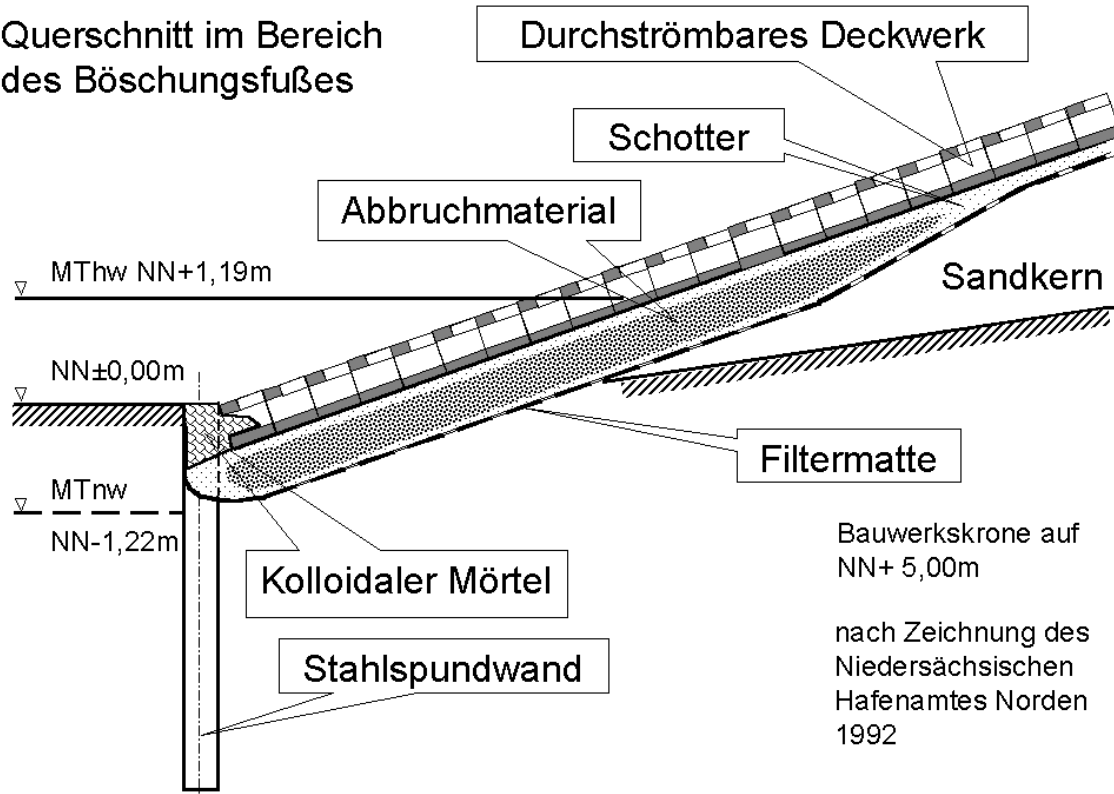


Abb.04: Querschnitt durch eine durchströmbare Böschungsabdeckung

Mit einer Vielzahl von Modelluntersuchungen im Labor für Hydromechanik und Wasserbau der FH Bielefeld [10] konnte gezeigt werden, dass tatsächlich über die Reduzierung der Brecherhöhe hinaus, die bekanntlich mit ihrem Quadratwert der Wellenenergie proportional ist, nicht nur auch der Wellenauflauf gemindert wird, vergl. Abb. 05, sondern auch Brecherform und Brecherposition (und damit die Art der Kopplung) im Sinne geringerer Bauwerksbelastungen günstig verändert werden: Je nach Böschungsneigung wird durch die durchströmbare Hohldeckwerksausführung in jedem Falle eine Veränderung des Brechertyps in der Art bewirkt, dass der Sturzbrecher, der bei Böschungen als einziger die gefürchteten Druckschläge erzeugen kann, hier in seiner ausgeprägten Form nicht auftritt.

Beispielhaft ist in Abb. 05 für eine in beiden parallel angeordneten Wellenkanälen gleich erzeugte Welle gezeigt, dass die Brechertransformation stark unterschiedlich erfolgt. Während an der quasi glatten Böschung (rechts) der durch einen Sturzbrecher erzeugte, bereits auf seinem Rückweg befindliche Auflaufschwall zu sehen ist, handelt es sich bei dem Vorgang an der durchströmbaren Böschung (links) um das aus den Hohlwürfeln seewärts austretende Wasser eines Reflexionsbrechers (collapsing breaker).

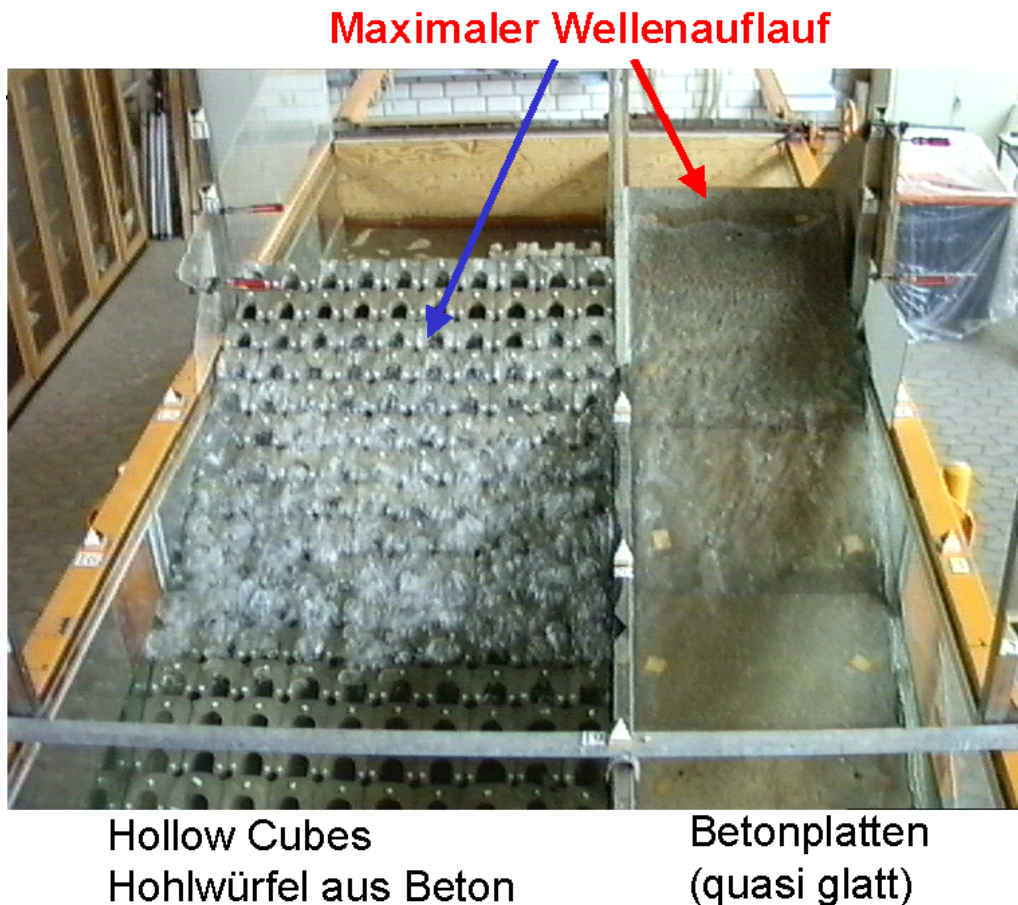


Abb.05: Vergleichsuntersuchungen an Böschungen 1: n = 1: 2

2. Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Hohldeckwerken

Fast alle seit 1990 ausgeführten Tests im Modellmaßstab 1: 5 betrafen sogenannte „Hollow Cubes“, als

- ebene einlagige Böschungsabdeckung oder
- getrept gestufte Anordnungen in Stapelbauweise mit 2 Lagen.

Als Vergleichsböschung wurde jeweils für beide Ausführungsformen eine konventionelle quasi glatte Böschung (bestehend aus Betonpflaster oder Betonplatten) synchron mit demselben (von der Wellenmaschine erzeugten) Steuerspektrum irregulärer Wellen beaufschlagt.

Zur vergleichenden Beurteilung der unterschiedlichen *Reflexionswirkungen* im Wellenfeld seewärts der Böschungsbauwerke waren an bis zu 90 Messpositionen mit Abständen von 10cm sowohl vor der glatten als auch vor der durchströmbaren Böschung Pegel zur Messung der Wasserspiegelauslenkungen bzw. Druckaufnehmer installiert. Deren zeitabhängige analoge Signale wurden zunächst der Fouriertransformation unterzogen, um u.a. für Aussagen bezüg-

lich des Energiegehaltes definierter Frequenzbänder und zur Berechnungen frequenzabhängiger Reflexionskoeffizienten verwendet zu werden, vergl. [03], [09].

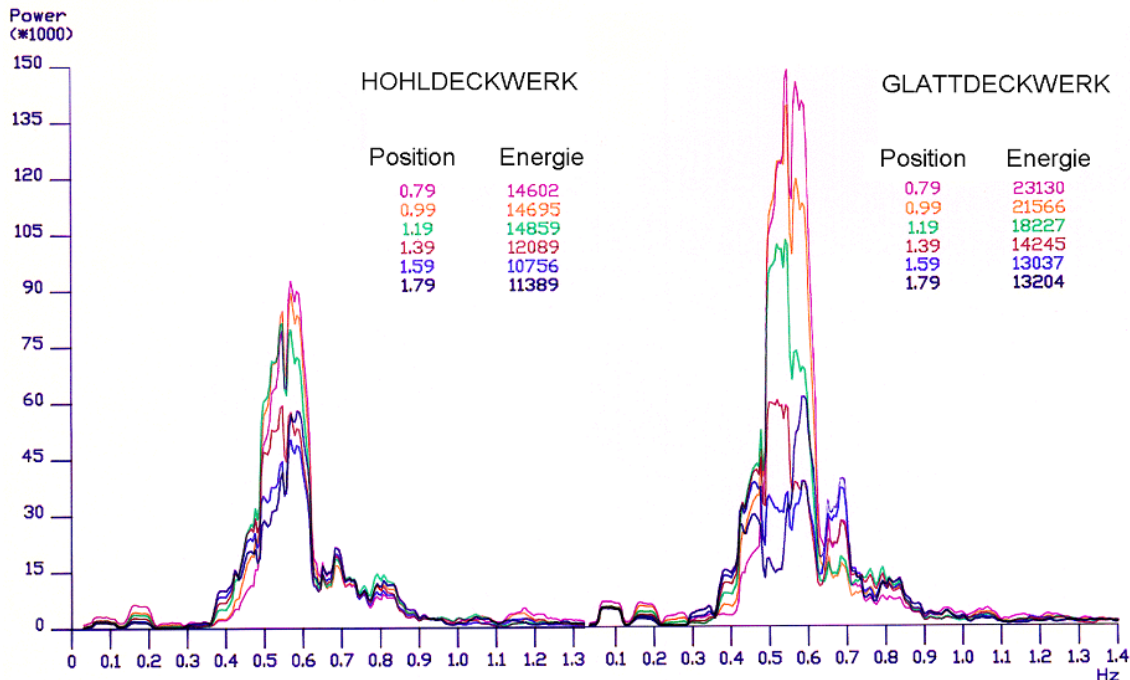


Abb.06: Synchron an der durchströmbaren und der glatten Böschung gemessene Energiespektren der vertikalen Wasserspiegelauslenkungen.

Die gemessenen bzw. berechneten Wellenspektren repräsentieren dabei an jeder Pegelposition die überlagerten vertikalen Wasserspiegelauslenkungen (Quadratwerte) der von See kommenden und der reflektierten Wellen (composite energy spectra) und die vom jeweiligen Spektrum eingeschlossene Fläche (integrated spectrum area IA) ist der resultierenden Wellenenergie proportional. Abb. 06 enthält für den Bereich vom Böschungsfuß (Station 1,79m) bis etwa in die Zone der maximalen Brecherinstabilität (Station 1,19m – 0,79m) jeweils 6 derartige übereinander dargestellte Spektren vor der durchströmbaren und vor der glatten Böschung.

Für die Brecherzone an einer 1:n = 1:3 geneigten Böschung war damit direkt belegt, dass hier die Energie an der durchströmbaren Böschung um etwa 37% geringer ist als an der glatten Böschung. Eine Auswertung bezüglich des gesamten Frequenzbereiches lieferte nach [03], [04] einen um 50% reduzierten Reflexionskoeffizienten C_R .

3. Ausführungsformen für unterschiedlich geneigte Böschungsbauwerke.

In [06] und [07] ist dargelegt, dass Hohlstrukturen etwa bis zu einer Böschungsneigung 1:n = 1:2 effektiv sind. Hierfür kommen je nach Bedeutung der

Wellenbelastung entweder noch die durchströmbaren ebenen einlagigen Böschungsstrukturen (Hollow Cubes) oder getrept gestufte Anordnungen in Stapelbauweise mit 2 Lagen in Betracht. Die letzteren dürften insbesondere für wellenbrecherartige Bauwerke in größerer Wassertiefe die effektivere Lösung darstellen. Nachfolgend werden Formkörper für beide Ausführungsformen jeweils basierend auf der Grundform von Betonhohlwürfeln vorgestellt sowie zugehörige Modellergebnisse mitgeteilt.

3.1 Großformatige Hohlwürfel mit einem Steg an einer Würfelkante

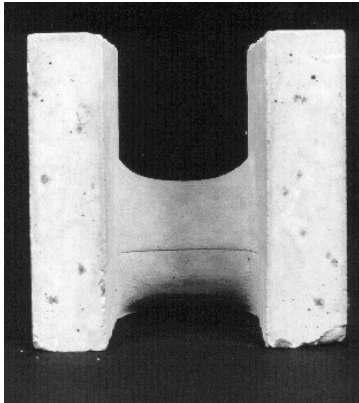


Abb.07: Großformatiger Hohlformkörper

Der in Abb.07 dargestellte Hohlformkörper ist vornehmlich für die Verwendung in Stapelbauweise etwa bei Wellenbrechern mit Einzelmassen von mehreren Tonnen vorgesehen.

Mit der in Abb.08 dargestellten regelmäßigen Stapelung sind dann die folgenden Vorteile verbunden:

- die Angriffsflächen für dynamische Liftkräfte oder etwaige Druckschlagkräfte sind minimal
- die Bewegungsfreiheit der Einzelblöcke ist stark eingeschränkt
- je höher die Porosität des Gesamtbauwerkes desto geringere Reflexionskoeffizienten sind erzielbar.



Abb.08: Großformatige Hohlformkörper bilden in Stapelbauweise eine Böschungsneigung 1: n = 1: 2.

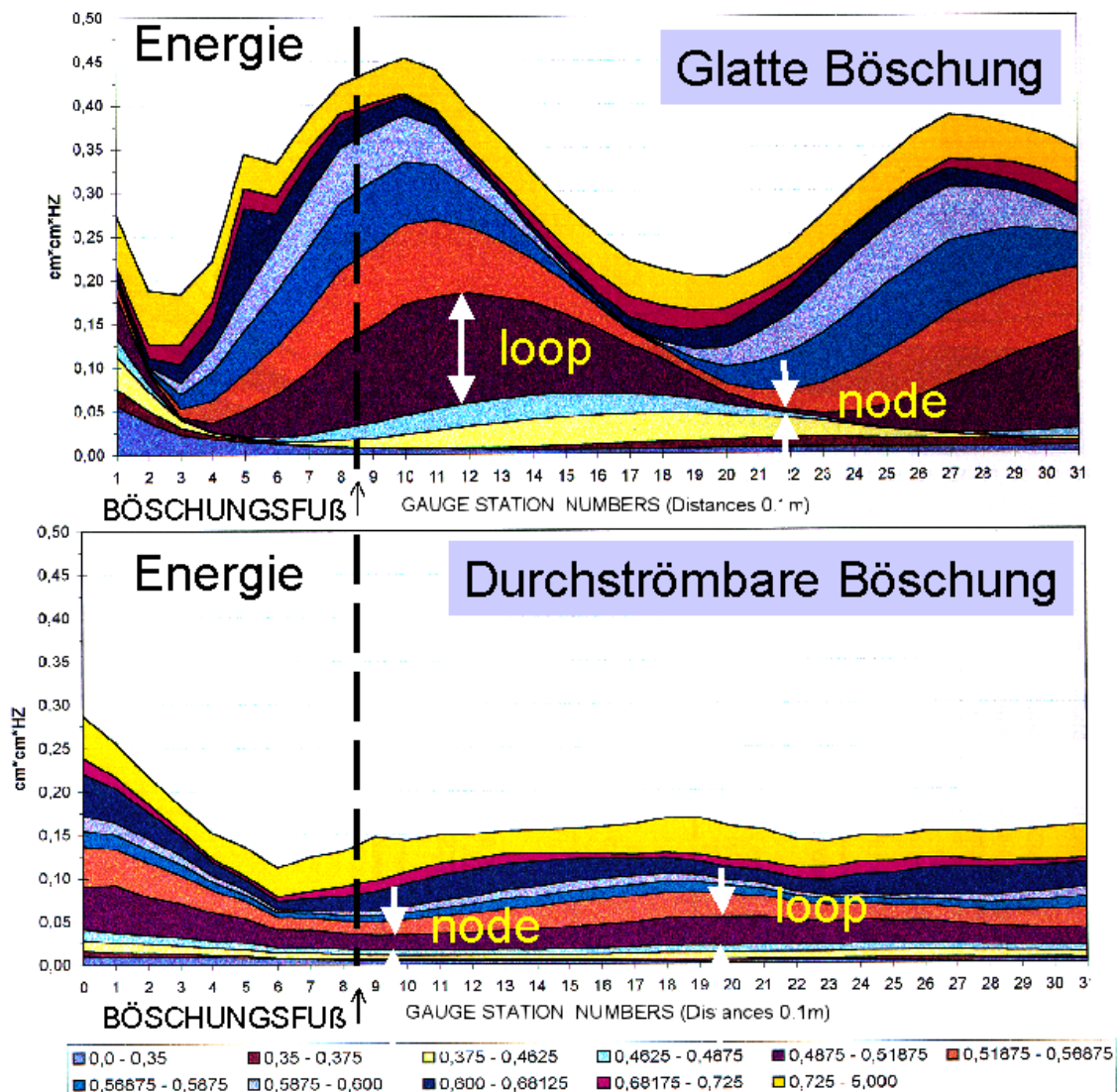


Abb.09: Energie der vertikalen Teilchenbewegung im Wellenfeld links (über der Böschung) und rechts vom Böschungsfuß nach [20], [21].

Aus dem Vergleich mit einer glatten Betonböschung ergibt sich nach Abb.09, dass am Fuße des Hohlbauwerkes die Wellenenergie lediglich noch etwa $\frac{1}{4}$ derjenigen vor einem glatten Bauwerk beträgt. Dementsprechend ergibt sich der Vergleich der Reflexionskoeffizienten für das gewählte Wellenspektrum wie folgt:

Glattdeckwerk: $0,5 \leq C_R \leq 0,85$

Sohldeckwerk: $0,1 \leq C_R \leq 0,3$.

Einzelheiten zu den verwendeten Analyse- und Auswerttechniken – insbesondere auch bezüglich frequenzbezogener Ergebnisse - sind u.a. in [09] zu finden.

Derselbe Hohlformkörper kann auch in einlagiger ebener Anordnung (mit dem Steg an einer Oberkante) verwendet werden, vergl. Abb.10, falls ein hinreichend standfester Böschungsunterbau auf andere Weise erstellt werden kann bzw. vorhanden ist.

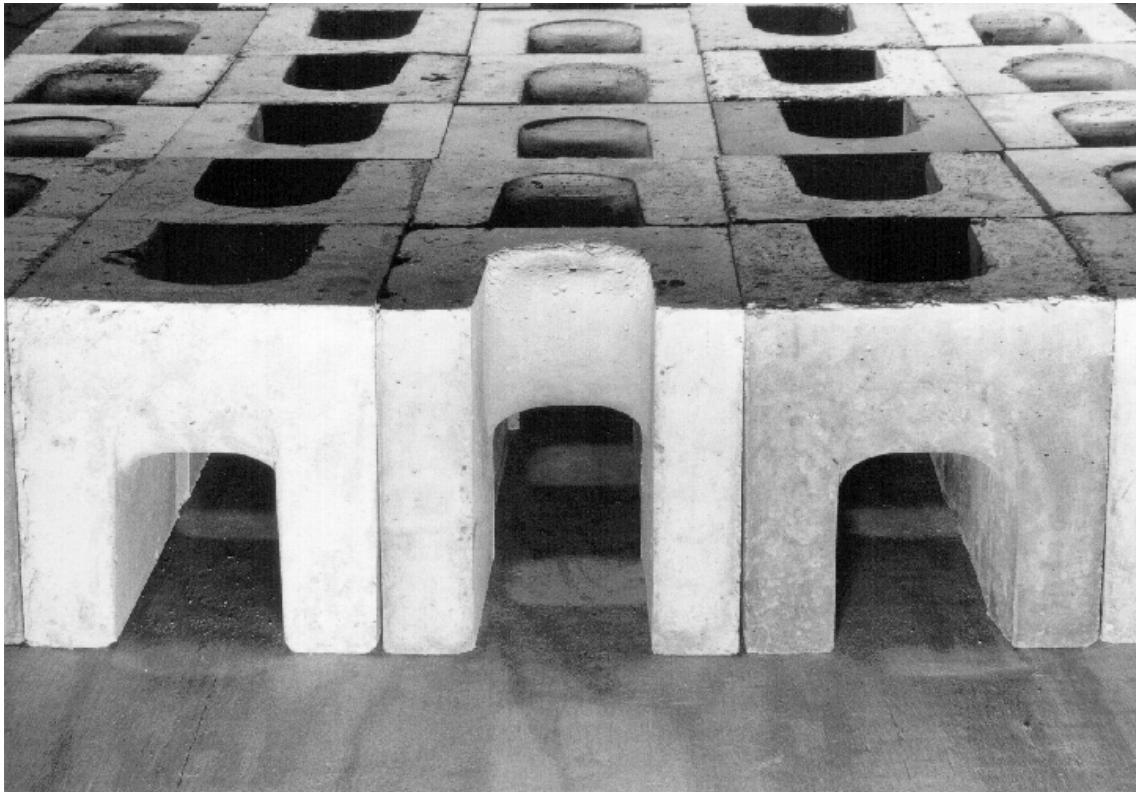
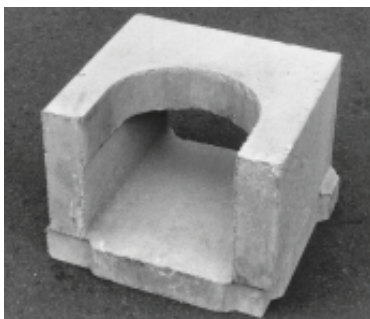


Abb.10: Unten offene Hohlformkörper als einlagige Schutzschicht auf stabiler Unterkonstruktion.

3.2 Hollow Cubes als einlagige Böschungsabdeckung



Im Gegensatz zu den oben beschriebenen großformatigen Hohlformkörpern sollen unter Hollow Cubes im engeren Sinne insbesondere solche Betonformkörper verstanden werden, die an ihrer Auflagerseite geschlossen ausgeführt sind, vergl. Abb.11 und 12.

Abb.11: Hollow Cube mit Verbundelementen an der Auflagerseite.



Abb.12: Hollow Cube mit Eckausnehmungen

In Abb.11 ist der für das Testbauwerk Baltrum verwendete Hohlformkörper dargestellt. Dieser war im Sinne eines besseren Verbundes durch Ausnehmungen und korrespondierende Anformungen in der Lagerfläche gekennzeichnet.

Derartige Anformungen hatten sich jedoch bei der Verlegung als hinderlich erwiesen. Da sie darüber hinaus auch bei Setzungen und Sackungen des Böschungskernmaterials nachteilige Wirkungen haben können, wird ihre Verwendung nicht mehr empfohlen.

Für die Aufnahme quasihydrostatischer Druckwasserkräfte aus dem Bauwerksinneren sollte bei geeigneter Formgebung auf eine über die Reibkräfte in den Stoßfugen hinausgehende Verbundwirkung verzichtet werden können.

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde deshalb der in Abb.12 abgebildete dementsprechende Hohlformkörper verwendet. In Abb.13 ist erkennbar, wie insbesondere durch eine geeignete Eckausbildung bei Hollow Cubes zugleich wichtige Nebenforderungen miterfüllt werden können.



Abb.13: Eckausbildung ermöglicht Druckwasserausgleich

Ausnehmungen an den vertikalen Kanten

- können im Sinne einer wirtschaftlichen Verlegungsmethode als Fixierhilfen (für Hydraulikgreifer) zur gleichzeitigen Aufnahme mehrerer Elemente dienen und
- bilden zugleich ausreichende Entlastungsöffnungen zum Abbau von Druckwasserkräften.

Entsprechend der Zielsetzung der geförderten Forschungsarbeiten wurde insbesondere die Lagestabilität der dargestellten „Hollow Cubes“ an 3 unterschiedlich geneigten Böschungen ($1:n = 1:1,5$; $1:n = 1:2,0$ und $1:n = 1:2,5$) im

Zusammenwirken mit der nachfolgend spezifizierten Unterkonstruktion im Modellmaßstab 1:10 untersucht.

4. Modellaufbau und verwendete Messtechniken

Der Wellenkanal des Labors für Hydromechanik und Wasserbau der FH Bielefeld (LHW) ist mit einer Trennwand ausgestattet, durch die Paralleluntersuchungen mit 2 Vergleichsböschungskonfigurationen ermöglicht werden, vergl. auch Abb.05 sowie unter Abschnitt 8]. Während der breitere Teilkanal (Breite $B = 1,0$ m) für die Untersuchung aller Böschungsneigungen mit den betreffenden Hohlformkörpern verwendet wurde, waren in den schmaleren Teilkanal (Breite $B = 0,6$ m) jeweils quasi glatte Vergleichsböschungen installiert, deren Feinstruktur jedoch - je nach verwendetem Baustoff (Betonplatten oder Betonsteine) - bei den unterschiedlichen Böschungsneigungen unterschiedlich war.

Da nur bei den $1:n = 1:2,5$ geneigten Böschungen zusätzlich Druckspannungsmessungen an deren Oberfläche durchgeführt worden sind, wird der Böschungsaufbau exemplarisch für diese Böschungskonfigurationen dargestellt [16], [17], [18].

Orientiert an dem beim Testbauwerk Baltrum vorliegenden Böschungsaufbau, vergl. Abb. 04, ergibt sich der Schichtaufbau im Modellmaßstab 1:10 etwa wie folgt:

Schicht	Material	Maße	Schichtdicke
Dammkörper	Sand		
Geovlies	Geotextil		2 mm
Steinschüttung	Kies	16/64	35 mm
Ausgleichschicht	Kies	4/8	15 mm
Deckschicht	Hohlformsteine	$100 \times 100 \times 100$ mm	100 mm

Die nachfolgende Serie von Bildern dokumentiert die chronologische Abfolge des Aufbaues der Böschungen zusammen mit der Installation von jeweils 8 Druckaufnehmern.



Abb.14: Dammkern – bestehend aus lehmigem Sand – mit Schlitz für den nachträglichen Einbau von 8 Druckaufnehmern..



Abb.15: Druckschläuche (als Standrohre mit der Mündung an der Deckwerksoberfläche) verbunden mit den im Kanalboden installierten Druckaufnehmerflanschen.



Abb.16: Geotextiler Filter zur Unterbindung von Ausspülungen bei ggf. auftretenden Porenwasserüberdrücken. Jeweils 8 Spiral-Druckschlauchdurchführungen.



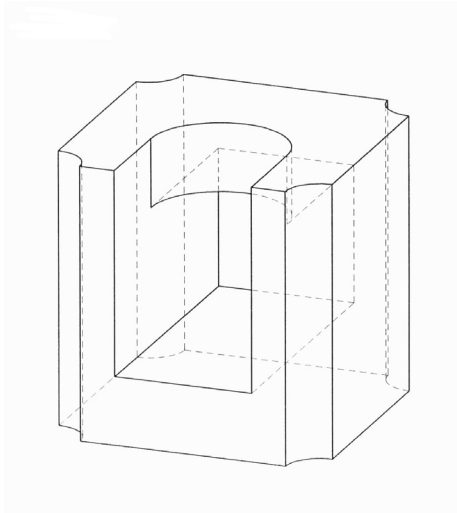
Abb.17: Filterschichten aus Schotter und Feinkies oberhalb des Geotextils; Gesamt-Schichtstärke: 0,08m.



Abb.18: Durchströmbare „Hollow Cubes“ links; „Hydroblocks“ rechts als quasi glatte Vergleichsstruktur. Druckausgleichslöcher mit Feinkies (bzw. Split) verfüllt.



Abb.19: Innenansicht eines in der Falllinie des Hohldeckwerkes von Hollow Cubes gebildeten Durchströmkanals.



Für die durchströmbare Deckschicht wurden jeweils die oben als sog. Hollow Cubes bezeichneten Hohlformkörper, vergl. Abb.20 und regelmäßig auf der Ausgleichsschicht angeordnet. Für deren Fertigung im Modellmaßstab aus Beton konnten dankenswerterweise die Mithilfe und die Einrichtungen des Labors für Baustoffkunde und Baustoffprüfung der FH Bielefeld, Prof. Dip.-Ing. W. Pützschler, in Anspruch genommen werden.

Abb.20: Hollow Cube; axonometrische Darstellung

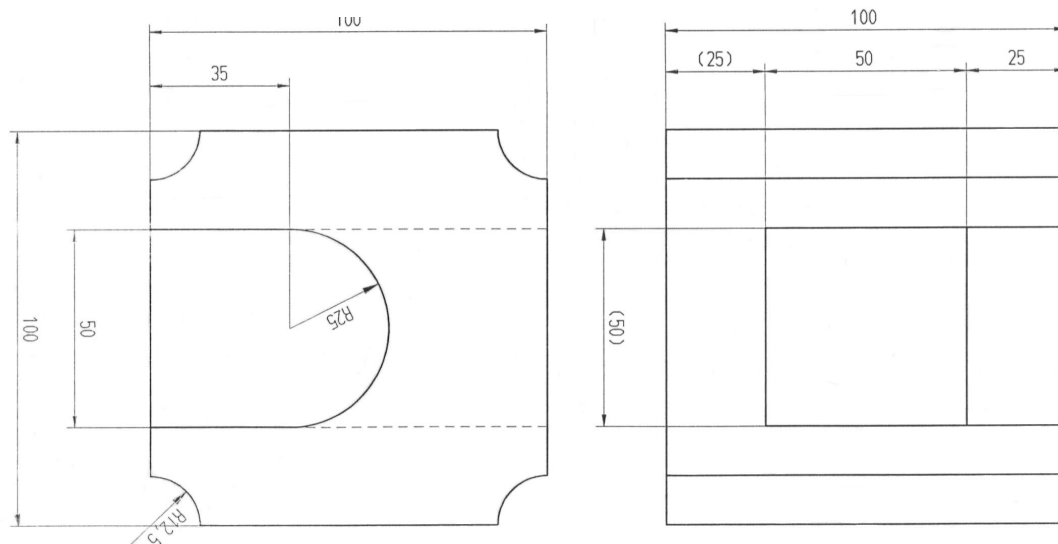


Abb.21: Hollow Cube; Aufsicht und Seitenansicht; Modellmaße in mm

Die für die quasi glatte Vergleichsböschung verwendeten Betonsteine mit der Markenbezeichnung „Hydroblock“ wurden von der produzierenden Fa. Green-Banks v.o.f., Erosion Control Systems, The Netherlands, - in ihrer Funktion als *Kooperationspartner* - kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Orientiert an Spektren, die der Verfasser während des Ablaufes einer schweren Sturmflut im Jahr 1973 in der Brandungszone vor Sylt gemessen hatte [19] , wurden 2 unterschiedliche Folgen irregulärer Wellen (A und B) für die Untersuchungen verwendet.

Spektrum A:

Bei der in Abb. 22 dargestellten Wellenfolge handelt es sich um eine relativ willkürliche Aufeinanderfolge von 11 verschiedenen Sinus-Signalen. Für die Gesamtdauer von etwa 190 s wurden 10 Pakete gebildet, die die gewählten Frequenzen in unterschiedlicher Reihenfolge enthalten.

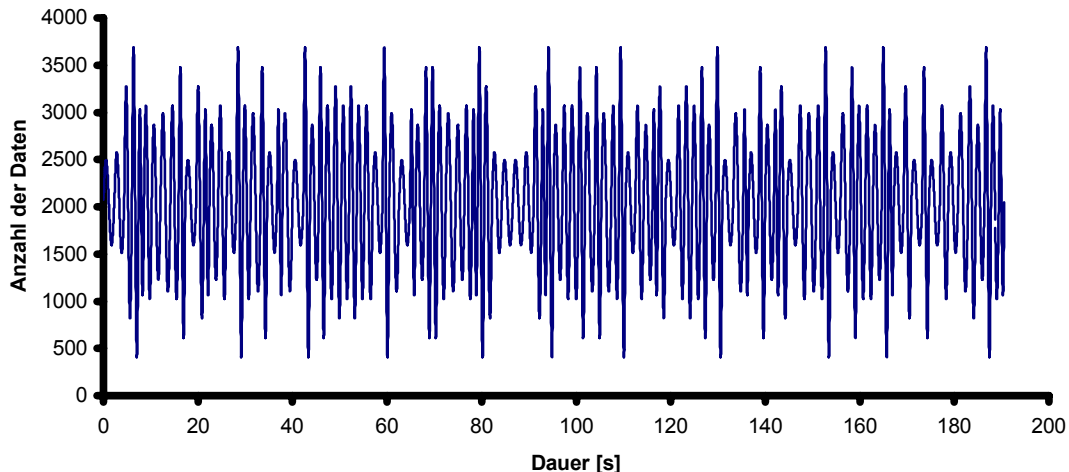


Abb.22: Unregelmäßige Wasserspiegelauslenkungen entsprechend Spektrum A als Input-Signal zur Steuerung des Wellengenerators.

Spektrum B:

Basierend auf den Dispersionseigenschaften von Schwerewellen (entsprechend einer normalen Dispersion), die dadurch gekennzeichnet sind, dass sich Wellen umso schneller ausbreiten je länger sie sind, können durch geschickte Überlagerung verschieden langer Wellen recht große Wasserspiegelauslenkungen erzeugt werden. Solche auch als „freak waves“ bezeichnete Wellen können in einem Wellenkanal dadurch entstehen, dass Wellen in der *Reihenfolge zunehmender Wellenlänge nacheinander erzeugt* werden. Dabei werden die kürzeren Wellen auf ihrem Wege vom Wellenerzeuger zur Versuchsböschung von den längeren Wellen eingeholt. Im vorliegenden Falle konnte auf diese Weise die Entstehung eines markanten Sturzbrechers *auch an der durchströmbaren Böschung* erzwungen werden. Anmerkung: Wie an anderer Stelle dieses Berichtes dokumentiert, wird die Ausbildung dieser markanten Brecherform bei *zufälliger Aufeinanderfolge* unterschiedlicher Frequenzen an einem durchströmten Deckwerk dadurch verhindert, dass zumindest eine Teilmenge des Rücklaufwassers der jeweils vorausgegangenen Welle innerhalb des Deckwerkes zurück läuft und zur vollständigen Ausbildung eines Sturzbrechers fehlt.

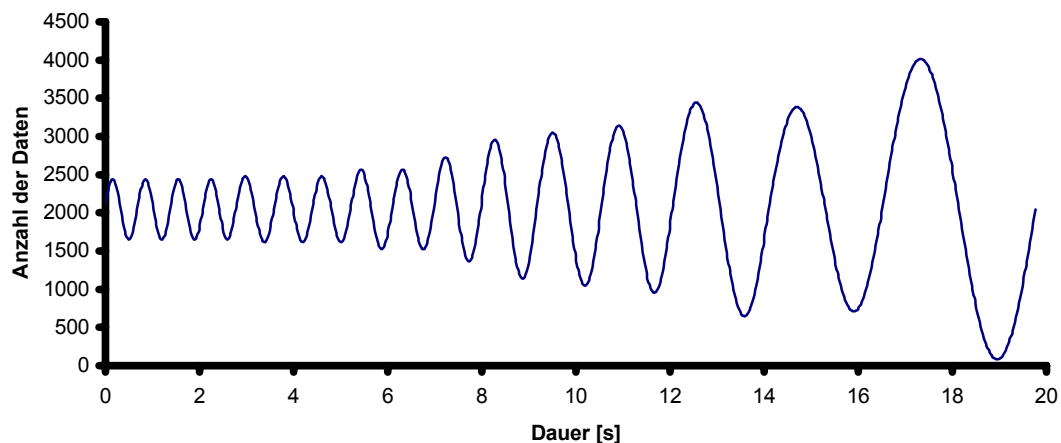


Abb.23: Sinus-Signal mit zeitlich zunehmender Periode entsprechend Spektrum B als Input-Signal zur Steuerung des Wellengenerators.

Zur synchronen Erfassung der Wasserspiegelauslenkungen wurden im Bereich von etwa 2 charakteristischen Wellenlängen ($\leq 3,5\text{m}$) unterschiedliche Anzahlen von Wellenpegeln der Hersteller Seasim Control Lmted., London bzw Delft Hydraulics, Delft, mit Hilfe geeigneter Tragkonstruktionen installiert. Der Pegelabstand war bei der Böschung $1:n = 1:1,5$ sehr gering zu 5cm gewählt worden und betrug bei den übrigen Böschungen 10cm. Die zugehörige Datenanalyse entsprach derjenigen unter Punkt 2 dargestellten.

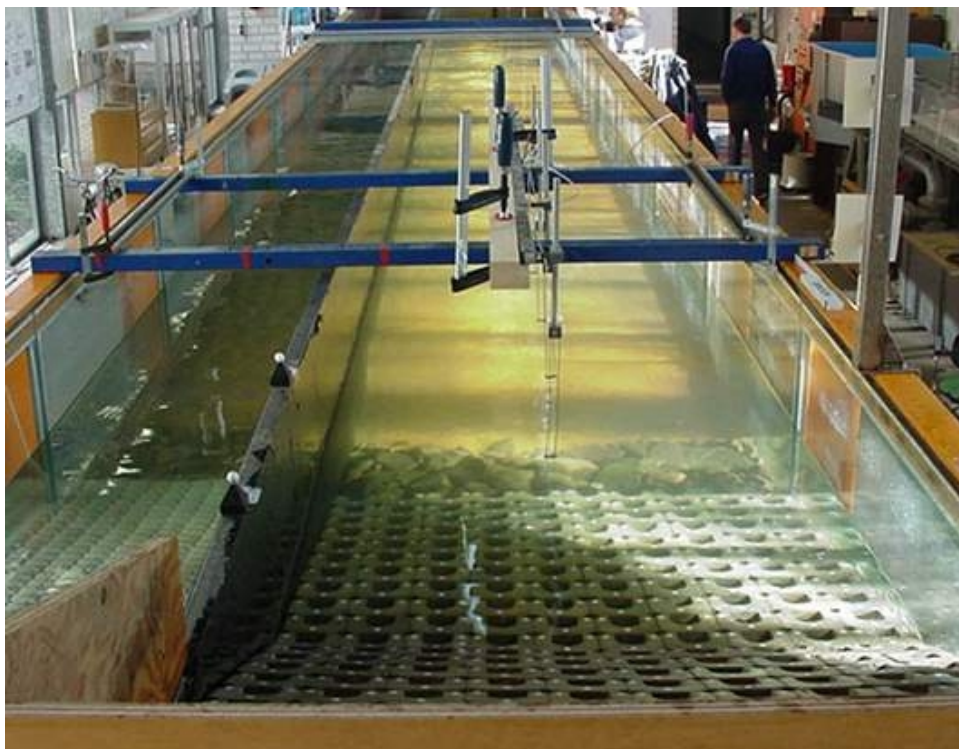


Abb.24: Wellenpegel vor der durchströmbaren Böschung $1:n = 1:2,5$.

5. Untersuchungsmethode zur Bauwerksstabilität

Entsprechend dem im Antrag formulierten Ziel der hier dokumentierten Forschungsarbeiten bestand die **Hauptaufgabe** insbesondere darin, die Lagestabilität von Hollow Cubes an *steileren* Böschungen (als etwa $1:n = 1:4$) zu prüfen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nach [6] und [7] Hohlstrukturen etwa bis zu einer maximalen Böschungsneigung $1:n = 1:2$ effektiv sind, wurde dementsprechend entschieden, Böschungen etwa im Bereich der genannten Grenzsteilheit, d.h., mit Neigungen $1:n = 1:1,5$, $1:n = 1:2$ und $1:n = 1:2,5$ zu untersuchen.

Da der Grad der Reflexion und damit die Wellenbelastung u.a. umso größer wird, je steiler die Böschungsneigung gewählt wird, war überdies am ehesten an einer Böschung mit *Grenzsteilheit* mit einer **Böschungsinstabilität** zu rechnen, deren Ursache im Sinne der Erarbeitung von Bemessungskriterien ggf. im Rahmen von Folgeuntersuchungen weiter behandelt werden kann.

5.1 Allgemeines zu Photogrammetrischen Messungen

Zur Beurteilung bzw. Dokumentation von Verformungen und Verschiebungen können räumlichen Strukturen vorteilhaft mit photogrammetrischen Methoden erfasst werden. Sehr genaue Informationen werden dabei durch Aufzeichnung und Ausmessung photogrammetrischer Bilder gewonnen. Es sind hierbei folgende Informationen zu unterscheiden:

1. Gestaltinformationen, zentralperspektive Abbildung der Objekte
2. Geometrische Informationen, Beziehung zwischen Bild und Objekt
3. Physikalische Informationen, optisches Reflexionsvermögen der Objekte

Die Aufnahmen der Fotos, in denen diese Informationen gespeichert werden, erfolgen mit einer digitalen oder analogen Messkamera. Die Auflösung photogrammetrischer Messverfahren kann bis $1:100.000$ erfolgen. Dies entspricht $0,1$ Millimeter bei einer Objektabmessung von 10 Metern.

Das zu vermessende Objekt wird von verschiedenen, frei wählbaren Standorten fotografiert. Bei kurzen Entfernungen zum Objekt ist darauf zu achten, dass zwischen dem Objekt und den verschiedenen Standorten jeweils ein Winkel von ca. 60° entsteht. Hilfestellung bei der Anwendung des Verfahrens erfolgte dankenswerterweise durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Pomaska, Labor für Vermessungskunde und Datenverarbeitung der FH Bielefeld.

5.2 Projektvorbereitung

Nachfolgend wird das Verfahren exemplarisch bezüglich der Ermittlung von Setzungen und Verschiebungen an der $1:n = 1:2,5$ geneigten Böschung, vergl. Diplomarbeiten Kix, U.[16], Reischl, C[17]. und Rocklage, O.[18], eingehender dargestellt. Auch der Großteil der verwendeten zugehörigen Abbildungen Bilder stammt aus den genannten Arbeiten.

Zur genauen Erfassung der jeweiligen Lage der einzelnen Deckwerkssteine auf der Böschung wurden alle Steine an jeweils 3 Stellen mit weißen Punkten gekennzeichnet. Darüber hinaus wurden 21 Festpunkte am Wellenkanal definiert.



Die Festpunkte bestanden prinzipiell aus kleinen, weißen Kugeln, die auf der Spitze schwarzer Holz-Pyramiden befestigt waren. Zur Verteilung der Festpunkte im Raum waren Anordnungen an den Kanal-Seitenwänden als auch darüber unter Verwendung besonderer vertikaler Tragelemente (Vierkantprofile) erforderlich.

←Festpunkt Nr.1

Abb.24: Übersichtsfoto der beiden Böschungen mit Festpunkten

Eine Befeuchtung der Punkte vor jeder Aufnahme hat sich im Sinne einer Verbesserung der optischen Reflexion (und damit der Qualität der Aufnahmen) als günstig erwiesen.

5.3 Erstellung der Fotos

Bei dem hier angewandten Verfahren der Mehrbildphotogrammetrie wurden im vorliegenden Falle 9 Kamera - Standorte festgelegt. Abb.25 zeigt indessen in einer Draufsicht nur die 7 Kamera – Standorte, die tatsächlich für die Bild-Auswertung verwendet worden sind.

Pos. Nr.: Kamerastandorte der verwendeten Bilder:

- 2→ Draufsicht (senkrecht zur Kanalsohle)
- 3→ Seitenansicht (auf der Seite der Hollow Cubes)
- 4→ Schräg zur Böschung (Im 45° Winkel zur Vorderansicht)
- 5→ Vorderansicht
- 6→ Seitenansicht (auf der Seite der Hydroblocks)
- 7→ Schräg zur Böschung (Im 45° Winkel zur Vorderansicht)
- 9→ Übersichtsfoto aus größerer Entfernung

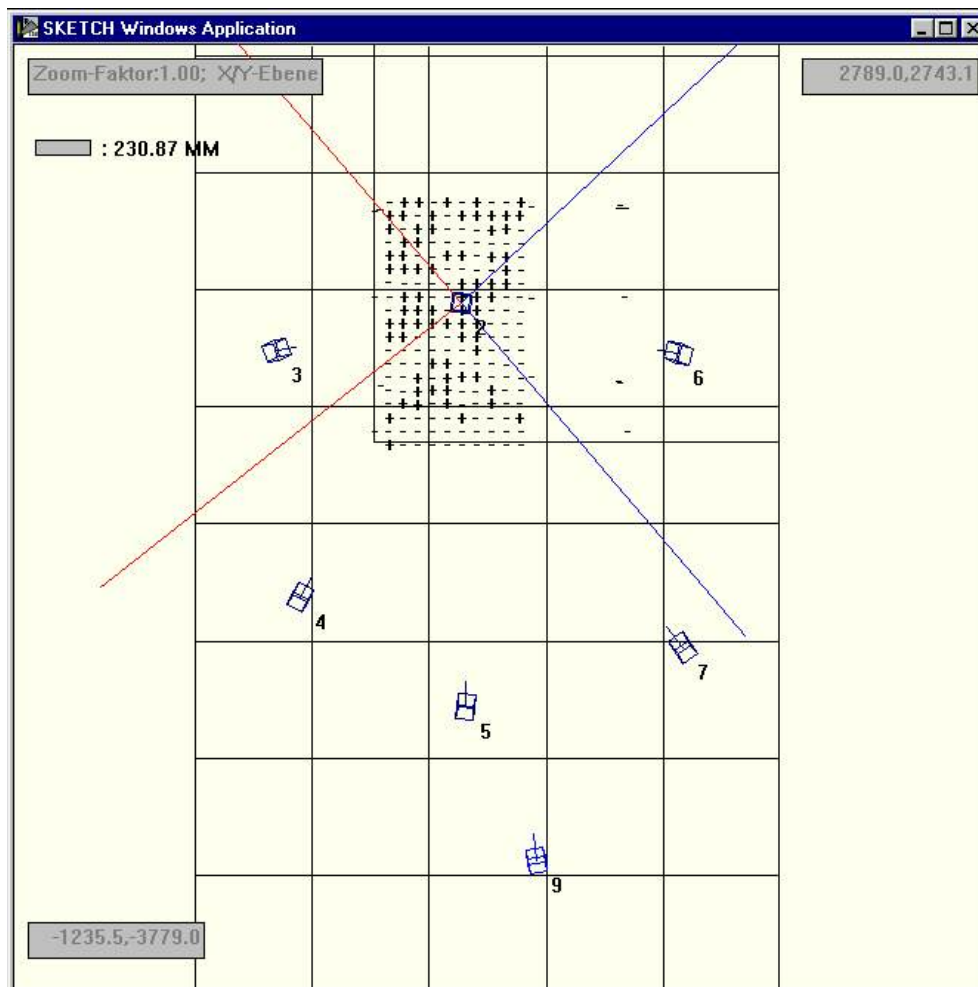


Abb.25: Kamerapositionen

Die Position der Steine auf der Böschung sind in der Mitte der Abb. 25 durch Kreuze und Striche gekennzeichnet. Als Koordinatennullpunkt war der Standort mit der **Pos.Nr.: 2** definiert.

Von den genannten sieben Kamerastandorten wurden in zwei Epochen Fotos nur vom Deckwerk mit den Hollow Cubes erstellt. Die ersten Aufnahmen der Epoche 0 (e0) wurden direkt nach der Fertigstellung der Böschung aufgenommen, entwickelt und auf Tauglichkeit überprüft. Die Aufnahmen der zweiten Epoche wurden erst am Ende der Untersuchungen, nach allen Messungen, Versuchen und einer zusätzlich simulierten, dreitägigen Sturmflut, vorgenommen. Aufteilung der Wellen:

Unregelmäßige Wellen (Messvorgänge)→	24 Spektren (1 Spektrum=>11*10 Wellen)
Freak-Waves (Messvorgänge)→	34*10 Freak-Waves =>340 Freak-Waves
Freak-Waves (simulierte Sturmflut)→	96*20 Freak-Waves=>1820 Freak-Waves

Insgesamt ergibt das 2.640 unregelmäßige Wellen entsprechend der durch das gewählte Spektrum A repräsentierten Wellengruppen und 2.160 sog. Freak-Waves, entsprechend Wellengruppe B, vergl. unter Punkt 4, S.20.

Anmerkung: Bei der Durchführung der Untersuchungen für die Böschungsneigungen $1:n = 1:1,5$ und $1:2$ waren teilweise andere Wellenkollektive verwendet worden, vergl. Punkt 6.

5.4 Die Kamera

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um die „Réseaukamera Rolleiflex 6006 metric“ von der Firma Rollei Fototechnik GmbH, Braunschweig. Der Kamera-Typ stellt eine einäugige, automatische Motor-Spiegelreflexkamera mit elektronischer Steuerung durch integrierten Prozessrechner, TTL-Belichtungsmessung (Blendensystem) und TTL-Blitzautomatik dar. Zusätzlich besitzt die Kamera eine fest eingebaute Messgitterplatte (Réseau), eine gerastete Entfernungseinstellung und eine Kalibrierung. Beim Fotografieren wird durch die Glasgitterplatte ein Bezugssystem auf die Fotos projiziert, welches für die spätere Bildpunktmessung erforderlich ist. Bei dem verwendeten Filmmaterial handelt es sich um Mittelformatfilme (Kodak Rollfilme 120– 400).



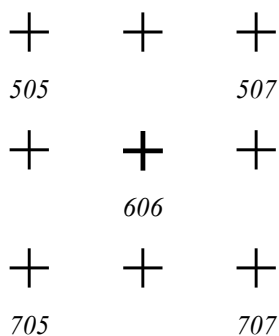
Abb.26: Réseaukamera

5.5 Bildbearbeitung unter Verwendung des Systems Rollei Metric (CDW)

Für jede Epoche wurde ein Film mit 12 Fotos angefertigt, von denen je 7 verwendet wurden. Die entwickelten Negative wurden im Labor für Bauvermessung der FH-Bielefeld Abt. Minden mit 1000 ppi als Bitmap gescannt. Die weitere Bearbeitung der Bilder erfolgte mit dem Programm „Rollei Metric CDW“ (Close Range Digital Workstation) von Rollei Fototechnik. Diese digitale Bildauswertungssoftware eignet sich sehr gut zur photogrammetrischen Mehrbildauswertung. Es ist möglich, digitale und analoge Aufnahmesysteme zu verarbeiten.

5.5.1 Réseaukreuzmessung

Nachdem die Bilder projektorientiert verwaltet worden waren, erfolgte die Auswertung. Dies geschah mit der Punktmessung und der Erfassung der Objektgeometrie mit Hilfe der „**Réseaukreuzmessung**“. Bei der Bildorientierung wird das digitale Bild in das Bildkoordinatensystem transformiert, automatisch eingemessen, mit den nominellen Werten verglichen und korrigiert. Diese Umrechnung, von Maschinenkoordinaten in Bildkoordinaten wird als „*innere Orientierung*“ bezeichnet. Die Lage des Bildes berechnet sich aus den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten der Festpunkte. Die Berechnung der Positionen und Aufnahmerichtungen aller Bilder (nach der Mehrbildorientierung) wird als „*äußere Orientierung*“ bezeichnet. Nach der Bildorientierung musste ein neues Projekt angelegt werden, in welches die Kameradaten eingegeben und gespeichert wurden. Danach konnten die 7 Bilder der beiden Epochen, die als Bitmaps eingescannt und gespeichert wurden, eingelesen werden. Bei der „Bildinitialisierung“ wurde den einzelnen Bitmaps eine Bildnummer zugewiesen. Damit konnten die Projektdateien markiert werden, um sie als Bilder auf den Arbeitsbildschirm zu laden..



Da mit der Kamera nur analoge Bilder erzeugt wurden, mussten die Réseaukreuze von Hand eingemessen werden, wobei jeweils die vier Kreuze (505, 507, 705, 707) um das Zentralkreuz(606) gewählt wurden. Falls dies nicht möglich gewesen wäre, hätte für die betreffende Einmessung ein anderes Rechteck gewählt werden müssen.

Abb.27: Réseaukreuze

Im Anschluss wurden die 21 Festpunkte auf dem Kanal manuell eingemessen. Die Anordnung der Festpunkte begann auf der rechten Kanalseite mit der Nr.1 (siehe 5.2) und endete auf der linken Kanalseite mit der Nr.18. Die Punkte 19, 20 und 21 befanden sich in der Kanalmitte zwischen den beiden Böschungen. Aufgrund der verschiedenen Kamerastandorte konnte in jedem Falle nur ein Teil der Punkte erfasst werden.

5.5.2 Mehrbildorientierung

Im Fenster „*NAWE Berechnung*“ des CDW-Programms waren alle Bilder zu markieren, um die Mehrbildorientierung zu durchzuführen. Es waren sechs Koordinaten von drei Festpunkten (PktNr.: 3, 15, 17), die nicht auf einer Geraden lagen und die Strecke zwischen Punkt 3 und Punkt 18 als Maßstabsinformation in die Systemfestlegung einzugeben:

Systemfestlegung

Koordinaten

Punkt: 3 X: 0 MM Y: 0 MM Z: 1000 MM

PktNr	X	Y	Z	akt.XYZ
3	0	0	1000	0 0 1
15	0	70	1000	1 0 1
17	0	70	1000	1 1 1

☐ Alle aktiv setzen

Kopieren Löschen Neu Drucken

Strecken

von: 3 nach: 16 Strecke: 1722 MM

☒ Strecke berechnen

PktNr	PktNr	Beob	akt.
3	16	1722	1

☒ Alle aktiv setzen

Kopieren Löschen Neu Drucken

Koordinaten importieren Abbrechen OK Hilfe

Abb.28: Systemfestlegung im CDW-Programm

Im Unterpunkt „*Ergebnisse*“ wurden die Daten der Mehrbildorientierung zuerst überprüft und im Unterpunkt „*Restklaffung*“ konnten die „Ausreißer“ deaktiviert werden, um diese bei der folgenden Ausgleichung auszuschließen.

5.5.3 Manuelle Bildpunktmessung

Zur Erfassung der Objektkoordinaten wurden die Bilder manuell mit der Bildpunktmessung bearbeitet, wobei zuvor die verschiedenen Parameter zur Bildpunktmessung eingestellt werden mussten. Dabei wurde zum Beispiel unterschieden bzw. eingestellt, ob die zu erfassenden Punkte hell oder dunkel erscheinen oder mit welchem Operator (Ellipsen- oder Schwerpunktoperator) das Punktezentrum errechnet werden sollte. Danach waren noch einige Parameter wie zum Beispiel die Cursorgröße, die Messempfindlichkeit oder die Schwellwertgröße einzustellen.

Bei der manuellen Bildpunktmessung waren die Lichtverhältnisse auf den zu bearbeitenden Fotos entscheidend. Je stärker sich die Markierung auf den Steinen von der Grundfarbe der Steine unterschieden hat, desto einfacher waren sie mit dem Cursor, welcher ein grünes Quadrat darstellte, zu erfassen. Bei jeder erfassten Markierung bekam der Stein eine Nummer zugewiesen, aus der die jeweiligen Zeilen- und die Spaltennummer hervorging.

5.5.4 Mehrbildorientierung und Bündelausgleichung

Mit den gesamten Punkten wurde jetzt nochmals eine Mehrbildorientierung durchgeführt, wobei diesmal auf die vorhandene Systemfestlegung zurückgegriffen werden konnte. Am Ende der Bildbearbeitung mit Rollei Metric wurde die Bündelausgleichung durchgeführt. Sie ermöglichte eine gemeinsame Berechnung und eine gemeinsame Ausgleichung eines photogrammetrischen Bildverbandes. Dabei wurden neben der photogrammetrischen Messung (Bildpunktmessung) auch die nicht photogrammetrischen Messungen wie zum Beispiel Strecken und Koordinaten mit in die Berechnung eingeführt.

Die Bündelausgleichung unterscheidet zwischen:

- Bildkoordinatenmessungen
- Kamerakalibrierungsdaten
- Strecken
- Koordinatenunterschiede ΔX , ΔY , ΔZ
- Punktkoordinaten X_i , Y_i , Z_i

Alle Daten, die in die Bündelausgleichung mit eingeführt werden sollten, wurden vor dem Start der Berechnung vom Programm entsprechend konfiguriert, wobei die einzelnen Parameter nach Wunsch individuell verändert werden konnten. [00, Rolle]

5.6 Auswertung

Der Vergleich der zwei Epochen durch Netzüberlagerung erfordert für beide eine identische Systemfestlegung. Durch die extrem genaue Bündelausgleichung wurden im Vergleich zu den Auswertungen für die Untersuchungen der Böschungen 1:n = 1:1,5 und 1:n = 1:2,0 relativ viele „Ausreißer“ produziert und später eliminiert. Dennoch wurden genug Steine bestimmt, damit der Verlauf der Böschungsdeformation hinreichend genau ermittelt werden konnte.

5.6.1 Deformation

Bei der Deformation wurden die genauen Bewegungen der Steine in X-, Y- und Z-Koordinaten-Richtung ermittelt. In Deformationstabellen sind die Deformationen der einzelnen Steine, die durchschnittliche Deformation und die maximale Deformation der Steine aufgeführt. [] Für die „durchschnittlichen Deformation“ wurden die Summen der Bewegungen pro Achse ermittelt und jeweils durch die genaue Anzahl der Steine dividiert. Als „maximalen Deformation“ wird die größte Bewegung in jeder Richtung bezeichnet.

Graphische Darstellungen für die unterschiedlichen Böschungsneigungen sind in Abschnitt 6.3 einander gegenübergestellt.

6. Untersuchungsergebnisse für Hollow Cubes an Böschungen $1:n = 1:1,5$, $1:n = 1:2,0$ und $1:n = 1:2,5$

6.1 Energie partiell stehender Wellenkomponenten

Die ggf. größere hydraulische Effektivität von Hohldeckwerken (gekennzeichnet durch einen *geringeren* Reflexionskoeffizienten C_R) gegenüber anderen Deckwerken wird hier aus dem Vergleich der aus der vertikalen Wasserspiegelauslenkungen stammenden Energien partiell stehender Wellen *seewärts der Böschung* abgeleitet, vergl. Abschnitt 2. Nur für die Untersuchungen der Böschungsneigung $1:n = 1:2,5$ standen darüber hinaus *Druckmessungen direkt an der Böschungsoberfläche* zur Verfügung, die mit einer vergleichbaren Technik ausgewertet werden konnten, vergl. 6.2.

Etwa wie in Abb.09 enthalten auch die nachfolgenden Abbildungen Abb.29 bis Abb.35 die Wellenenergie als Funktion der Böschungsentfernung, jedoch bezüglich dazu unterschiedlicher Steuerspektren (Wellenfolge A bzw. B).

Da bei den hier dargestellten geförderten Forschungstätigkeiten die *Bauwerksstabilität* vorrangig zu behandeln war, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, alle durch die verwendete spektrale Untersuchungsmethode gelieferten Ergebnisse - insbesondere im Zusammenhang mit partiell stehenden Wellenkomponenten - umfassend zu interpretieren, vergl. hierzu insbesondere [09].

Es sei hier aber herausgestellt, dass sich die vorteilhafte Wirkung der *einlagig verlegbaren Hollow Cubes* im Vergleich zu derjenigen vorteilhaften Wirkung der *großformatigen Hohlformkörper in Stapelbauweise*, vergl. Punkt 2, auf unterschiedliche Frequenzbänder bezieht. In Übereinstimmung mit der Zuordnung der längeren Wellen zu größeren Wassertiefen können gerade hier für den langwelligen Bereich durch großvolumige Hohlformkörper noch relativ große Dämpfungswerte erzielt werden, während an küstennäheren, flacheren Standorten gerade die hier untersuchten kleineren Hollow Cubes zur Dämpfung des höher frequenten Spektralbereiches ($0,6 \leq f \leq 0,8$ Hz im Modell, vergl. Abb. 31 bis 34) ausreichen.

Erwartungsgemäß ergeben sich für die Böschungsneigung $1:n = 1:1,5$ aus dem Vergleich der Abb. 29 und 30 nur geringe Unterschiede. Dies liegt allerdings nicht nur an der großen Böschungssteilheit sondern insbesondere daran, dass hier die Wellenfolge B verwendet worden ist, vergl. Ausführungen zum Spektrum B, S. 20.

Für die Böschungsneigung $1:n = 1:2$ sind demgegenüber markante Unterschiede insbesondere hinsichtlich der Brecherenergie (linke Seite in den betreffenden Abbildungen 31 und 32) (Wellenfolge A) erkennbar.

Für die Böschungsneigung $1:n = 1:2,5$ erstreckt sich die Dämpfung auch auf den seewärtigeren Bereich der partiell stehen Wellen, vergl. Abb. 33 und 34 (Wellenfolge A). Insgesamt stellt sich das Maß der Dämpfung jedoch im Vergleich zu den früher durchgeführten Untersuchungen für die Böschungsneigung $1:n = 1:3$, vergl. Abschnitt 0, weniger eindrucksvoll heraus.

Der Grund ist darin zu suchen, dass der Massivanteil der verwendeten „Hollow Cubes“ mit 64% tatsächlich um rd. 12% höher gewählt worden war, als bei den für das Tastbauwerk Baltrum verwendeten Hohlformkörpern (52%). Es gilt somit für alle Hohlformkörpertypen die triviale Feststellung, dass eine umso größere Beeinflussung (Wellendämpfung) erzielt wird, je größer die Abmessungen der Hohlformkörper relativ zur Wellenlänge sind.

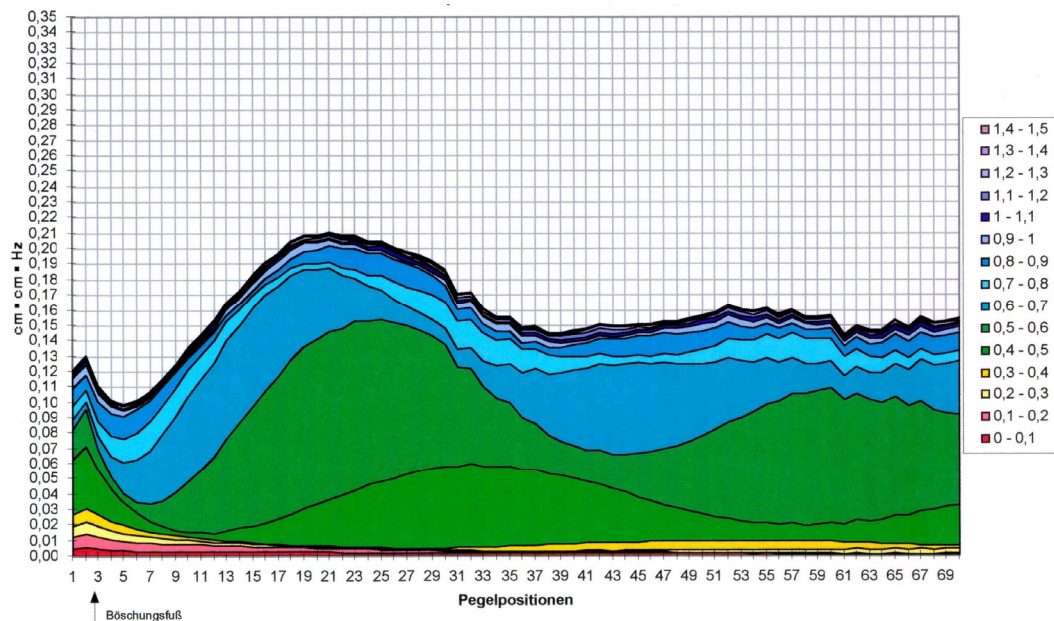


Abb.29: Wellenenergie an einer quasi glatten Böschung 1: 1,5 (Hydroblocks), Wellenfolge B, Pegelabstand 5cm [15]

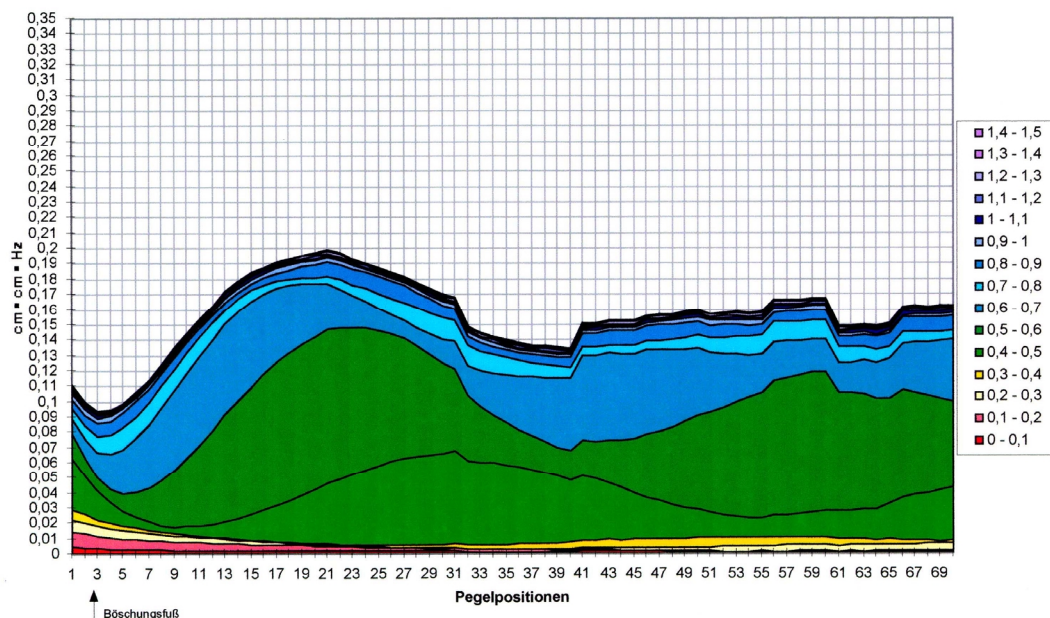


Abb.30: Wellenenergie an einer durchströmbaren Böschung 1: 1,5 (Hollow Cubes), Wellenfolge B, Pegelabstand 5cm [15]

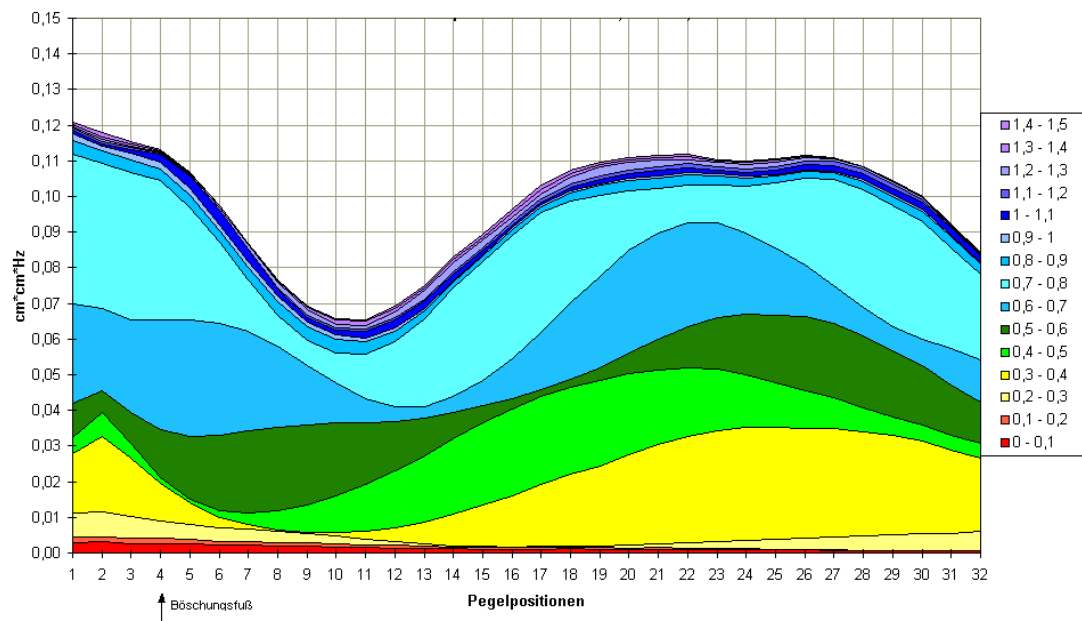


Abb.31: Wellenenergie an einer quasi glatten Böschung 1: 2,0 (Betonplatten), Wellenfolge A, Pegelabstand 10cm [13], [14]

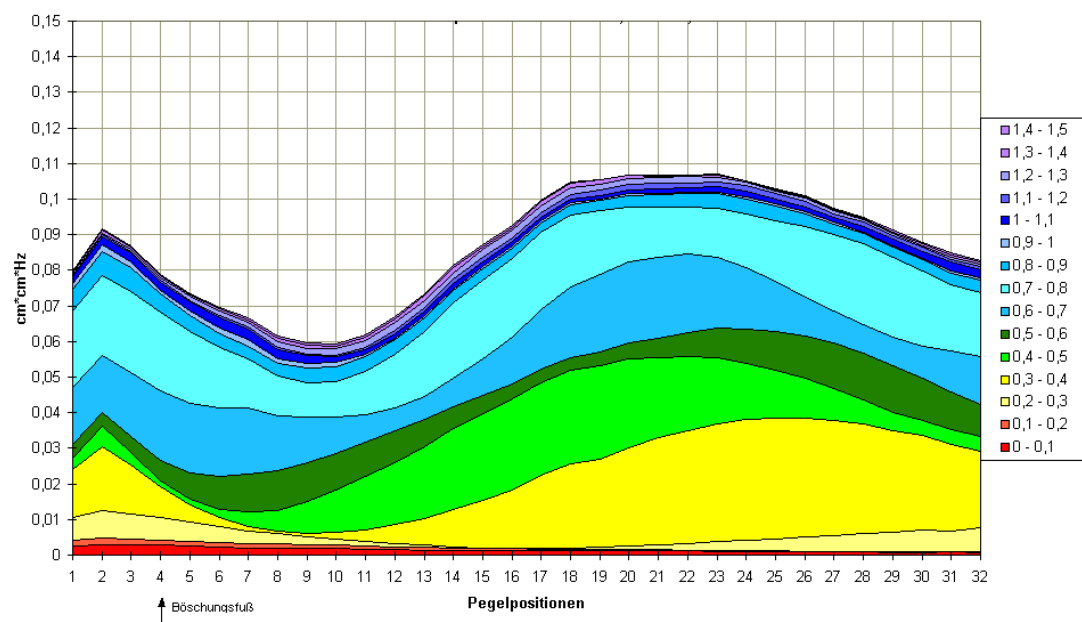


Abb.32: Wellenenergie an einer durchströmbaren Böschung 1: 2,0 (Hollow Cubes), Wellenfolge A, Pegelabstand 10cm [13], [14]

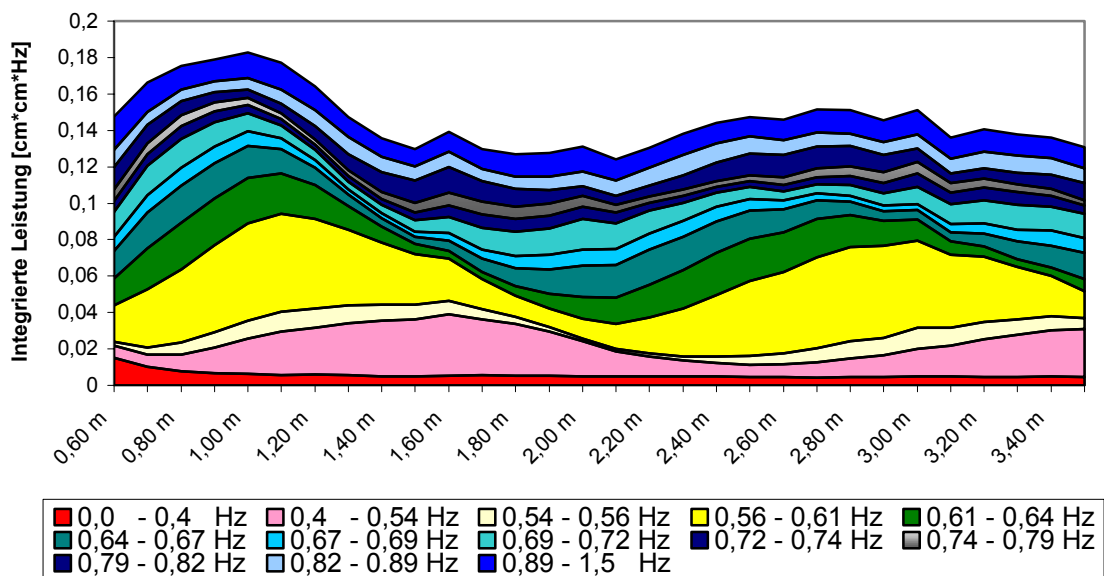


Abb.33: Wellenenergie an einer quasi glatten Böschung 1: 2,5 (Hydro-blocks), Wellenfolge A, Pegelabstand 10cm [16],[17],[18]

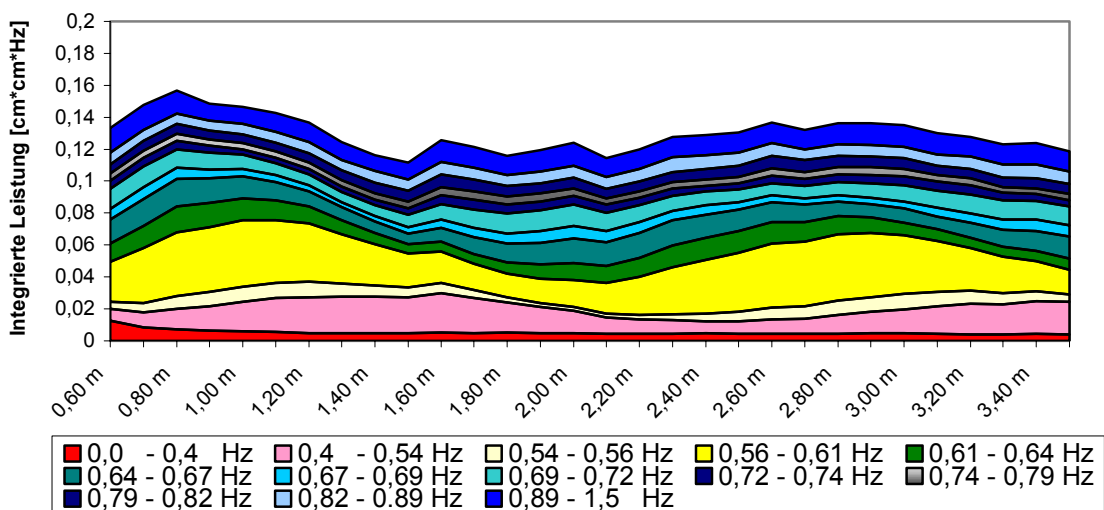


Abb.34: Wellenenergie an einer durchströmbaren Böschung 1: 2,5 (Hollow Cubes), Wellenfolge A, Pegelabstand 10cm [16],[17],[18]

6.2 Energie brechender Wellen an der Böschung 1:n = 1:2,5

Auf gleiche Weise wie für die Energie partiell stehender Wellen (6.1) wurde die sog. „Druckspannungsenergie“ - wiederum unter Verwendung der Wellenfolge A - an beiden zu vergleichenden Böschungen ermittelt. Mit der nachfolgenden Gegenüberstellung in Abb. 35 und 36 sind insbesondere die an beiden Böschungen unterschiedlichen Brecherformen dokumentiert.

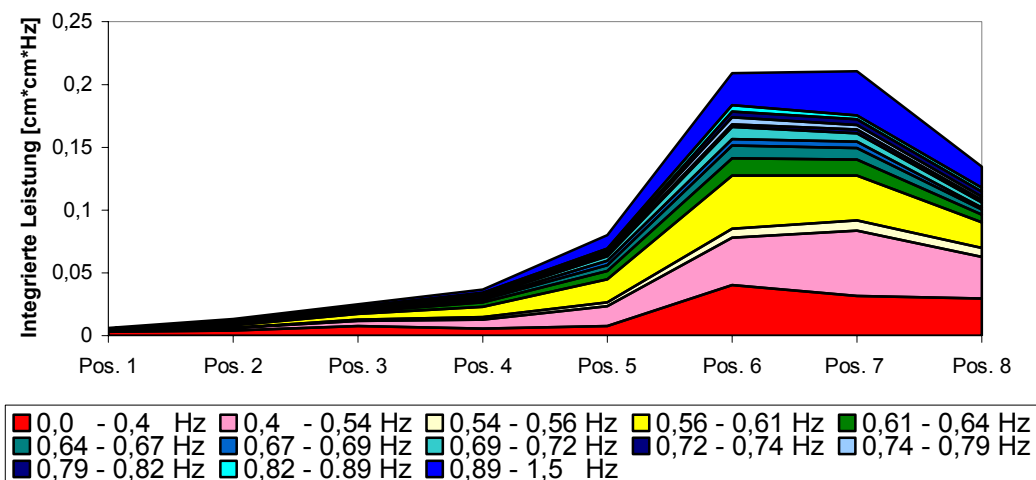


Abb.35: „Druckenergie“ an einer glatten Böschung 1: 2,5 (Hydroblocks) infolge von Sturzbrechern (plunging breakers) [16],[17],[18]

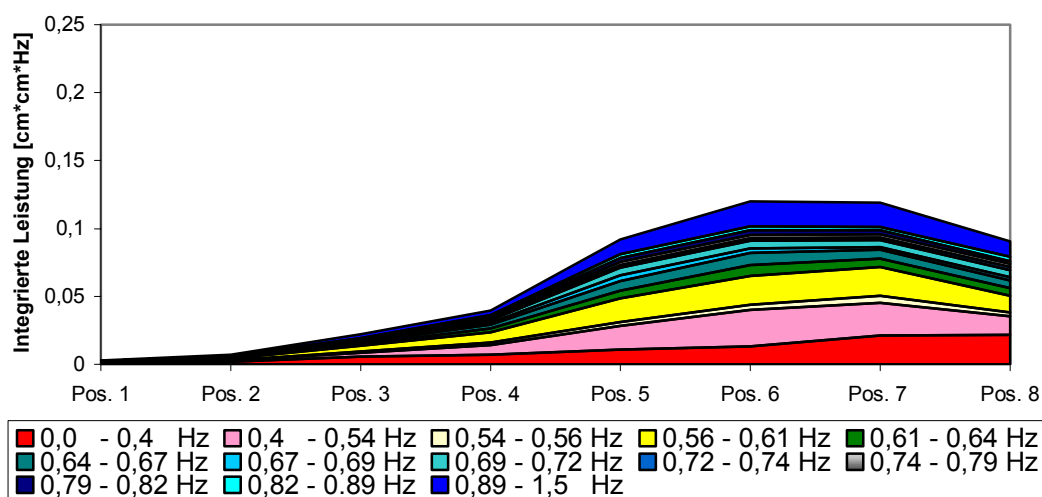


Abb.36: „Druckenergie“ an einer durchströmbaren Böschung 1: 2,5 (Hollow Cubes) infolge von *partiellen* Sturzbrechern (collapsing breakers) [16],[17],[18]

Zur Erzielung möglichst großer Bewegungen im Sinne einer **Böschungsinstabilität** wurde bei dem Großteil der Untersuchungen das Spektrum B verwendet. Wegen der oben dargelegten speziellen Überlagerung von Fourierkomponenten, kommt es hier zu etwa ähnlichen Brecherformen an beiden Böschungen.

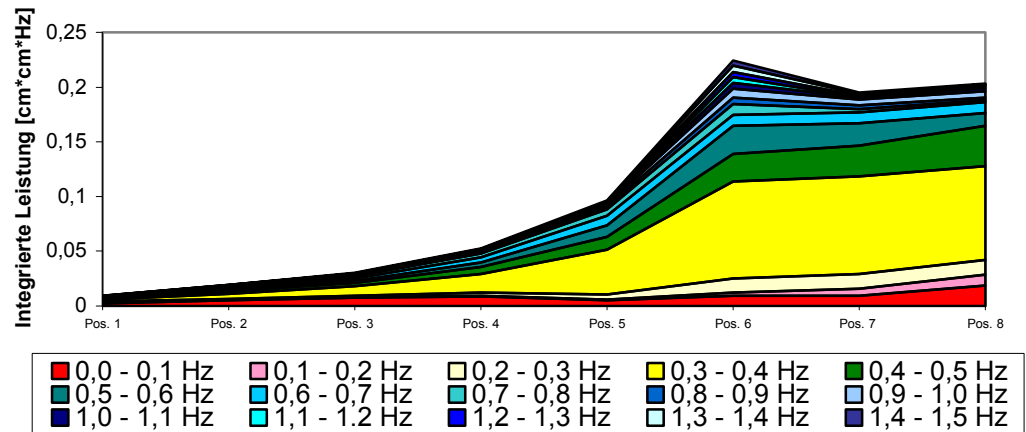


Abb.38: „Druckenenergie“ an einer glatten Böschung 1: 2,5 (Hydroblocks) infolge von Sturzbrechern (Freak Waves), Wellenfolge B, [16],[17],[18]

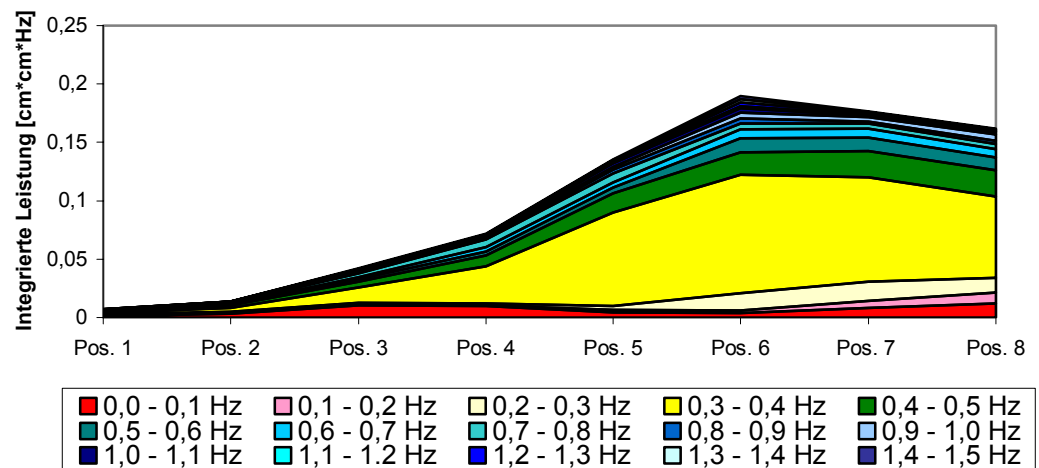


Abb.39: „Druckenenergie“ an einer durchströmbaren Böschung 1: 2,5 (Hollow Cubes) infolge von Sturzbrechern (Freak Waves), Wellenfolge B [16],[17],[18]

6.3 Böschungsbewegungen

In Anbetracht der Tatsache, dass bei *keiner* der drei untersuchten Böschungen resultierende Verschiebungen einzelner Hollow Cubes in Richtung der wasserseitigen Deckwerksoberfläche beobachtet worden sind, kann gefolgert werden, dass eine Gefahr des Herauslösen einzelner Deckwerkssteine bei der hier gewählten Formgebung der Hollow Cubes offenbar nicht bestanden hat. Im Gegensatz dazu war ein solches Herauslösen einzelner Elemente der quasi glatten Böschungsstruktur sehr wohl aufgetreten. Ein direkter Vergleich kann indessen nicht angestellt werden, da das Flächengewicht der Hollow Cubes erheblich größer war als Flächengewicht der Elemente auf der Vergleichsböschung (Gewichtsverhältnis etwa 1: 0,57). Für diesbezügliche künftige Untersuchungen bzw. Anwendungen sollte demnach im Sinne der *Optimierung der hydraulischen Effektivität* und der weiteren Materialeinsparung *eine weitere Verringerung des Massivanteils* der Hohlformkörper in Betracht gezogen werden.

6.3.1 Böschungsneigung 1:n = 1:1,5

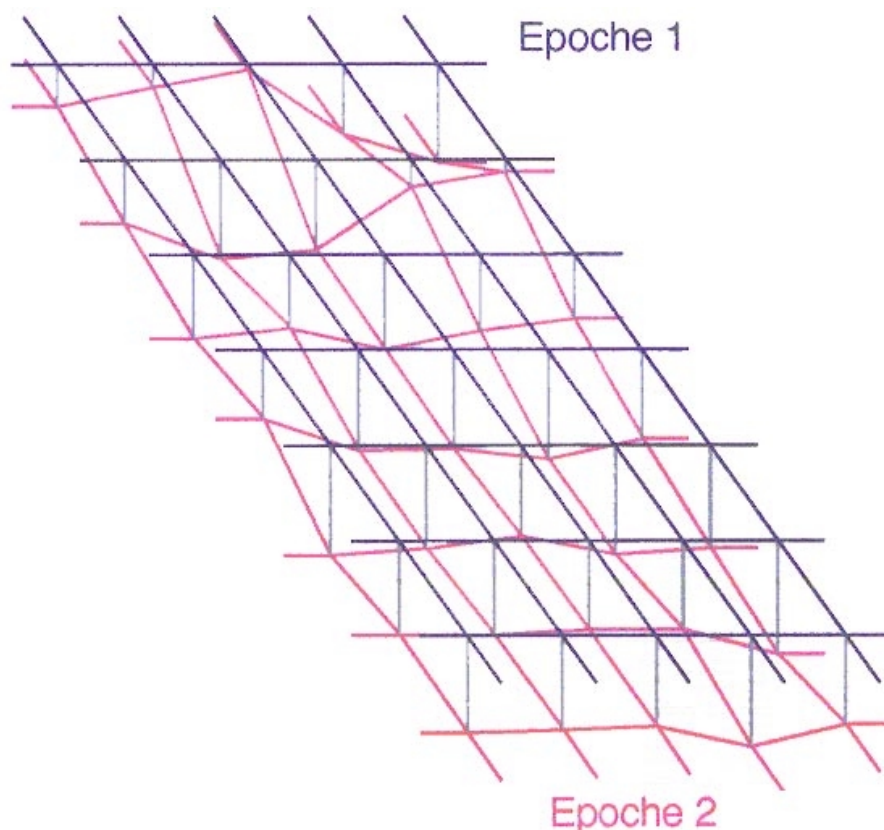


Abb.40: Vertikale Komponente der Verschiebungen an einer durchströmbaren Böschung 1: 1,5 (Hollow Cubes) infolge von 6.000 Sturzbrechern (Freak Waves, Wellenfolge B); überhöht dargestellt. Maximale Einzelverschiebung 4,0mm [15]

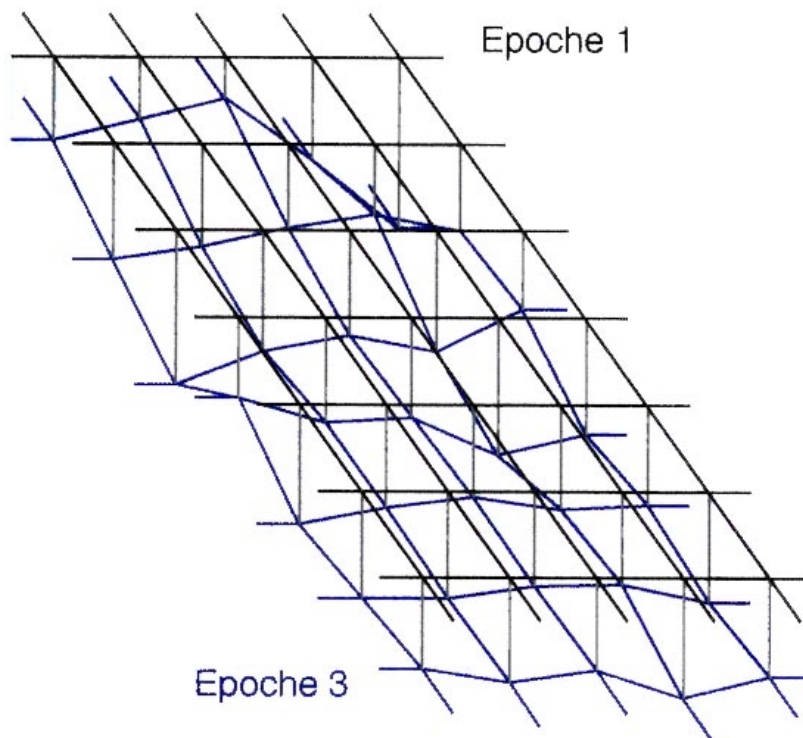


Abb.41: Vertikale Komponente der Verschiebungen an einer durchströmbaren Böschung 1: 1,5 (Hollow Cubes) infolge von 12.000 Sturzbrechern (Freak Waves, Wellenfolge B); überhöht dargestellt. Maximale Einzelverschiebung 6,5mm [15]

6.3.2 Böschungsneigung 1:n = 1:2,0

Bei allen untersuchten Böschungen sind auch horizontale Verschiebungen aufgetreten und zwar in Richtung auf die Trennwand, die zwischen den Teilkanälen vorhanden ist. Tatsächlich haben genauere Messungen ergeben, dass die Trennwand gegenüber den übrigen Berandungen (Längswänden des Wellenkanals) eine bedeutend geringere Stabilität aufweist.

Die Auswirkung auf die Gesamtverschiebungen sind insbesondere aus der axonometrischen Darstellung für die Böschung 1:n = 1: 2,0, vergl. Abb. 42 ersichtlich.

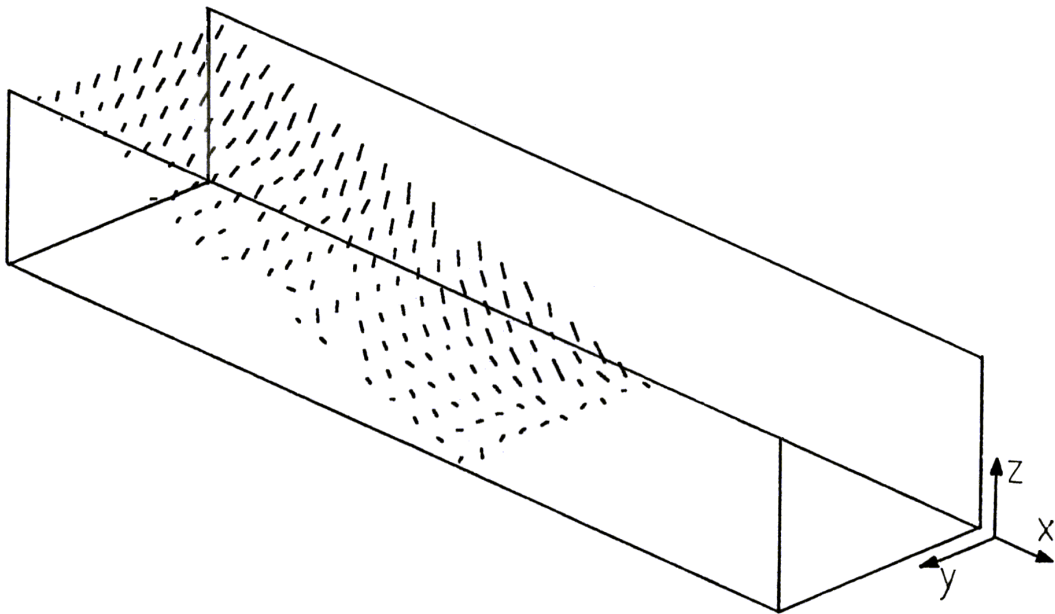


Abb.42: Gesamtverschiebungen an einer durchströmbaren Böschung 1: 2,0 (Hollow Cubes) infolge von 12.000 Sturzbrechern (Freak Waves, Wellenfolge B); überhöht dargestellt. Maximale Einzelverschiebung 3,5mm [13] [14]

6.3.3 Böschungsneigung 1:n = 1:2,5 (nach [16],[17],[18])

Auf der folgenden Abbildung Abb.43 sind die Bewegungen der einzelnen Steine in drei verschiedenen Ansichten dargestellt. Obwohl nur ein Teil der Steine erfasst wurde, ist deutlich zu erkennen, in welcher Richtung sich die Steine am meisten bewegt haben.

In der Vorderansicht (oben links) ist deutlich erkennbar, dass sich die Steine wiederum wie bei der Böschung 1:n = 1:2,0 leicht zur Mittelwand (rechte Böschungsseite) hin bewegt haben. Hier beträgt die durchschnittliche Verschiebung 3,9 mm. Ebenfalls ist in dieser Vorderansicht genauso wie auch in der Seitenansicht (unten links) gut zu erkennen, dass sich die Steine in die entgegengesetzte Richtung der Z-Achse nach unten bewegt haben, d.h., in Richtung des Böschungskernbodens.

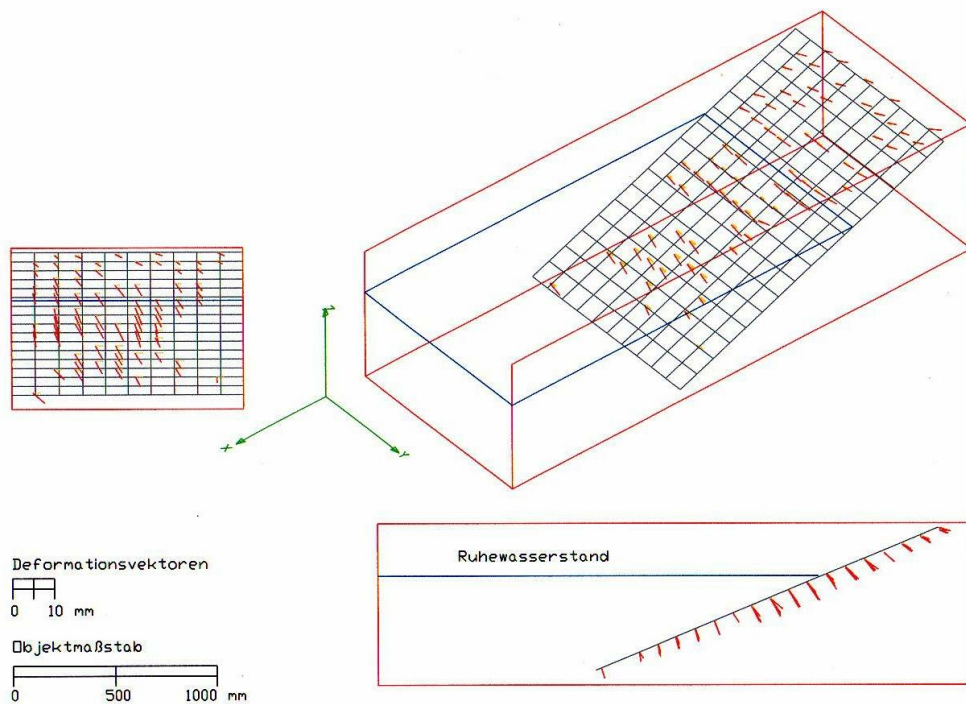


Abb.43: Die Bewegung der Steine aus drei Ansichten

Die durchschnittlichen Deformation in z-Richtung beträgt etwa $-4,9$ mm. In X-Richtung sind die geringsten Bewegungen mit rd. $3,0$ mm aufgetreten.

Generell sind die Bewegungen bzw. Setzungen der Steine im Bereich um den Ruhewasserspiegel am größten, da dort die Brecherzunge auf die Böschung auftrifft.

Zur besseren Übersicht ist die Seitenansicht der resultierenden Verschiebungen vergrößert in Abb.44 dargestellt.

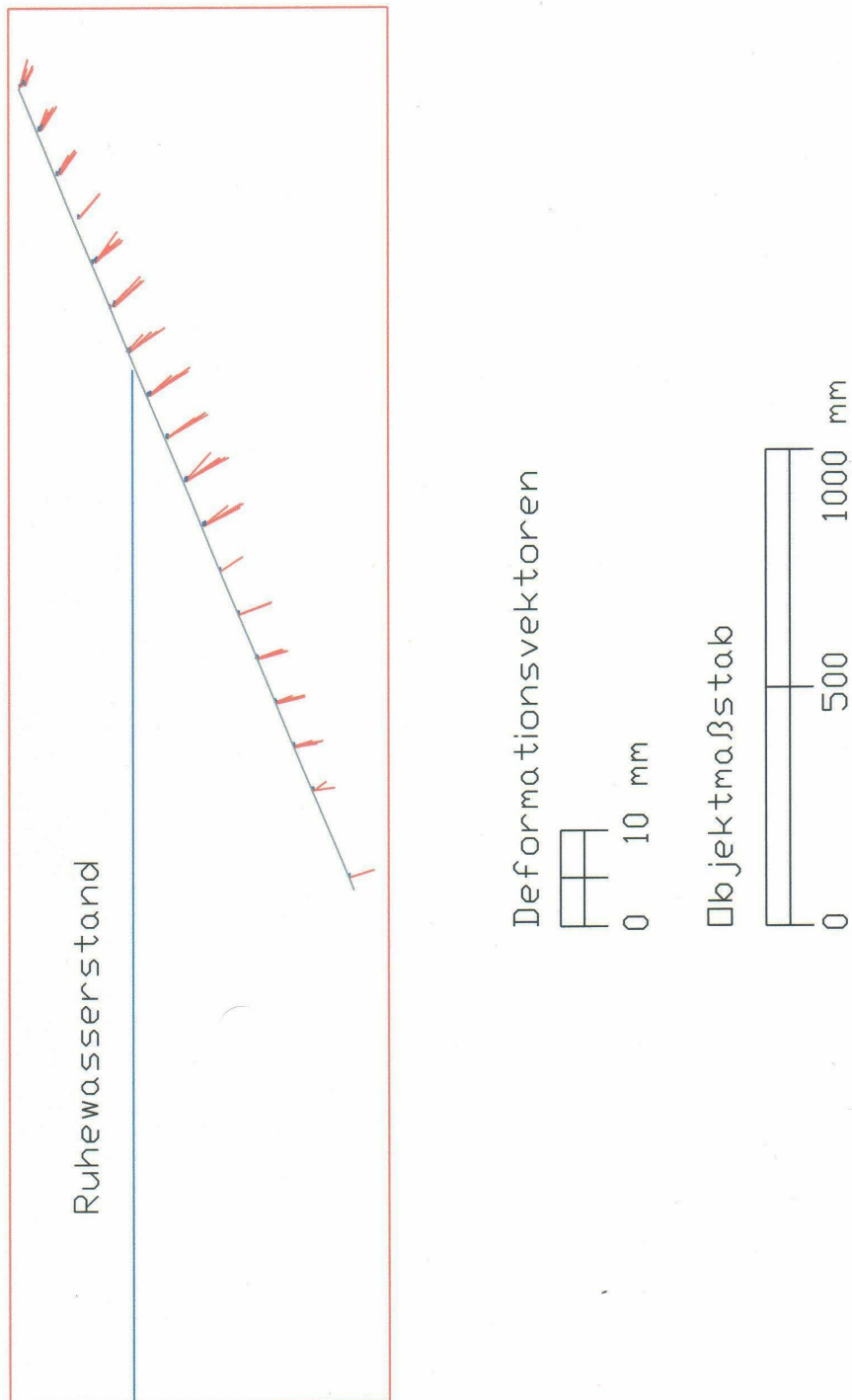


Abb.44: Seitenansicht der resultierenden Verschiebungen infolge von 2.600 irregulären Wellen (Folge A) und 2.160 Sturzbrechern (Freak Waves; Wellenfolge B), vergl. 5.3

7. Schrifttum

- [01] Büsching, F.: Durchströmbare Böschungsstrukturen, BAUINGENIEUR Nr. 66, p.11-14, 1991
- [02] Büsching, F.: Embankment Protection Structure; European Patent Office Nr.91103801.6-2303, 1991 p.1 – 47.
- [03] Büsching, F.: Wave and Downrush Interaction on Sloping Structures, Proc. 10th International Harbor Congress, Antwerpen, Belgium, 1992 p 5.17-5.25.
- [04] Büsching, F.: Imperfect Reflection from Permeable Revetment Structures, 1st Int.Scientific Colloquium CAE TECHNIQUES, Rzeszow, Poland, 1994 p.177-189.
- [05] Büsching, F.: Hollow Revetment Elements, COPEDEC IV, Rio de Janeiro, Brazil, 1995 p. 961 – 976.
- [06] Büsching, F.: On the Change of Reflection from Different Sloping Structures, 2nd Int. Scientific Colloquium CAE TECHNIQUES, Bielefeld, Germany 1995 p.305-314.
- [07] Büsching, F.: Reflection from Hollow Armour Units, COPEDEC V, Cape Town, South Africa 1999 p.1362 - 1370.
- [08] Büsching, F.: REFLECTION ESTIMATES DERIVED FROM STRUCTURAL RESPONSE SPECTRA, 4th International Colloquium CAx TECHNIQUES, Bielefeld, 1999 p. 401 – 410.
- [09] Büsching, F.: Dispersion and Reflection at Sloping Structures, Proc. PDCE'2000 Conference Varna, Bulgaria Vol.I, 2000 p.29 – 38.
- [10] Büsching, F.: Präsentation „Hollow Cubes“ - Hohlwürfel -,Eigenverlag 2001 CD 49 Folien
- [11] Büsching, F.: Combined Dispersion and Reflection Effects at Sloping Structures, Proc. ICPMRDT- Int. Conf. on Port and Marine R&D and Technology, Singapore 2001
- [12] Büsching, F.: Hollow Cubes – Durchströmbare Hohlformkörper als Bauelemente wellenbelasteter Böschungsabdeckungen, Die HANSA 2001, in Vorbereitung
- [13] Bierauer, M-A., [14] Corinth, K.S.: Diplomarbeiten „Reflexion kurzer Wellengruppen an einer Böschung aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes), FH Bielefeld, 1999, unveröffentlicht

- [15] Ortmann, O.: Diplomarbeit „Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung $1:n = 1:1,5$ “ FH Bielefeld, 2000, unveröffentlicht
- [16] Kix, U., [17] Reischl, C, [18] Rocklage, O.: Diplomarbeiten „Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung $1 : n = 1 : 2,5$ “, FH Bielefeld, 2001, unveröffentlicht
- [19] Büsching, F.: „On Energy Spectra of Irregular Surf Waves“, Proc. 15th Int. conf. on Coastal Eng., Honolulu USA, 1976
- [20] Lemke, S., [21] Nicolai, A. : Diplomarbeiten „Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit einer Neigung $1 : n = 1 : 2,0$ “, FH Bielefeld, 1997, unveröffentlicht

8. Bilddokumente



Abb.45: Wellenkanal der FH Bielefeld; Spektren-Wellengenerator am Kanalende



Abb.46: Einbau von Filterschichten und Hollow Cubes an einer Böschung
 $1:n = 1:2$

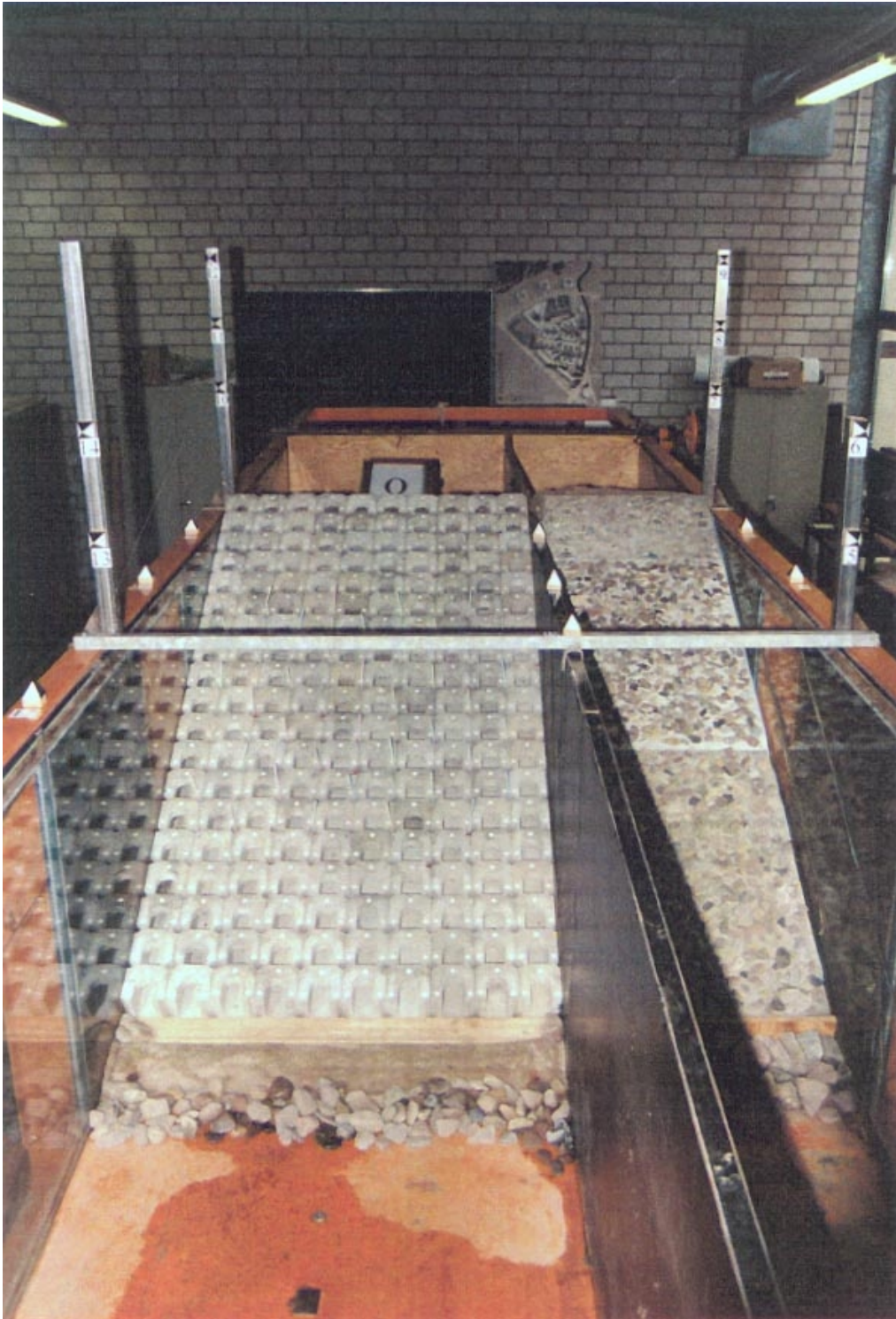


Abb.47: Durchströmbare Böschung (Hollow Cubes) links; Betonplatten rechts

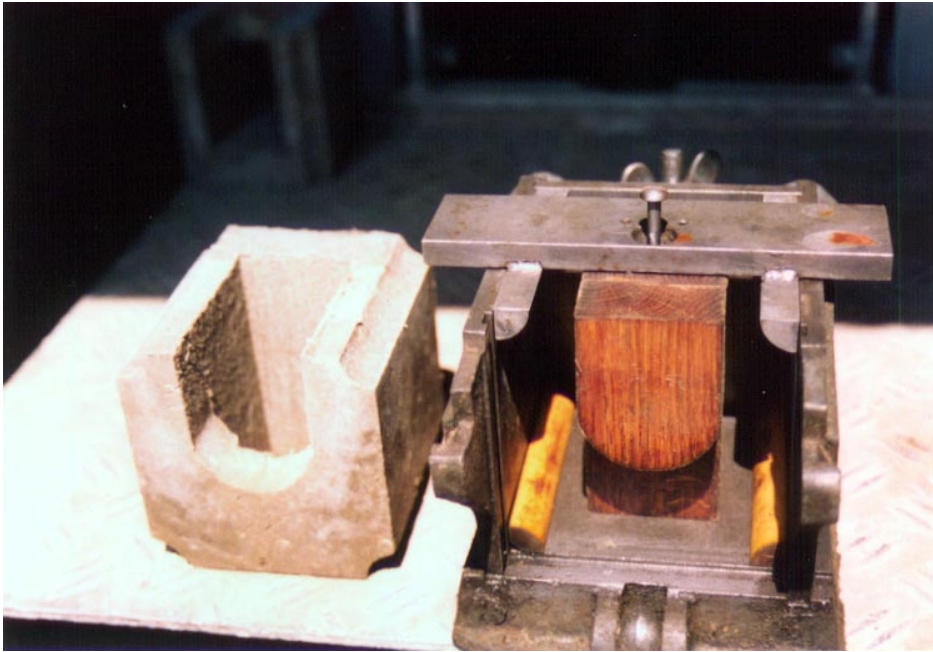


Abb.48: Herstellungsform für Modell Hollow Cube

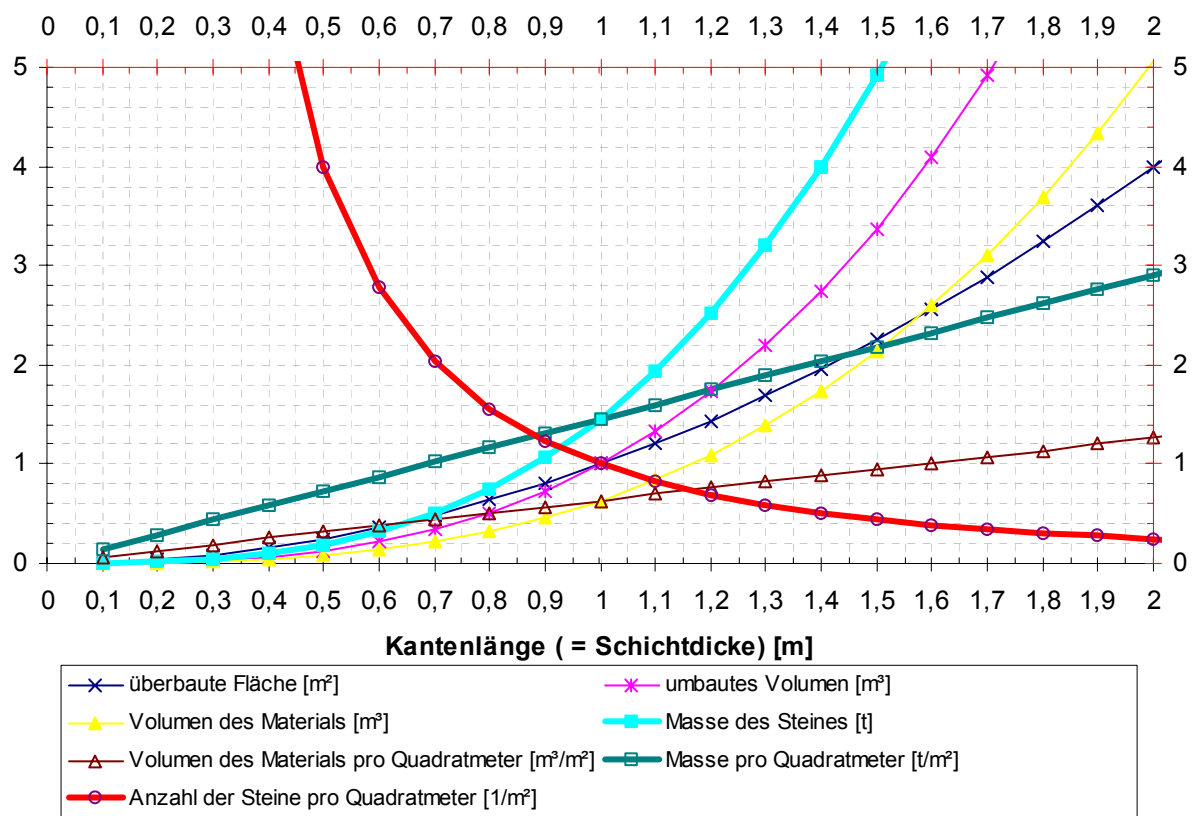


Abb.49: Hollow Cubes: Anzahlen, Volumina und Massen pro m^2 in Abhängigkeit von der Schichtdicke

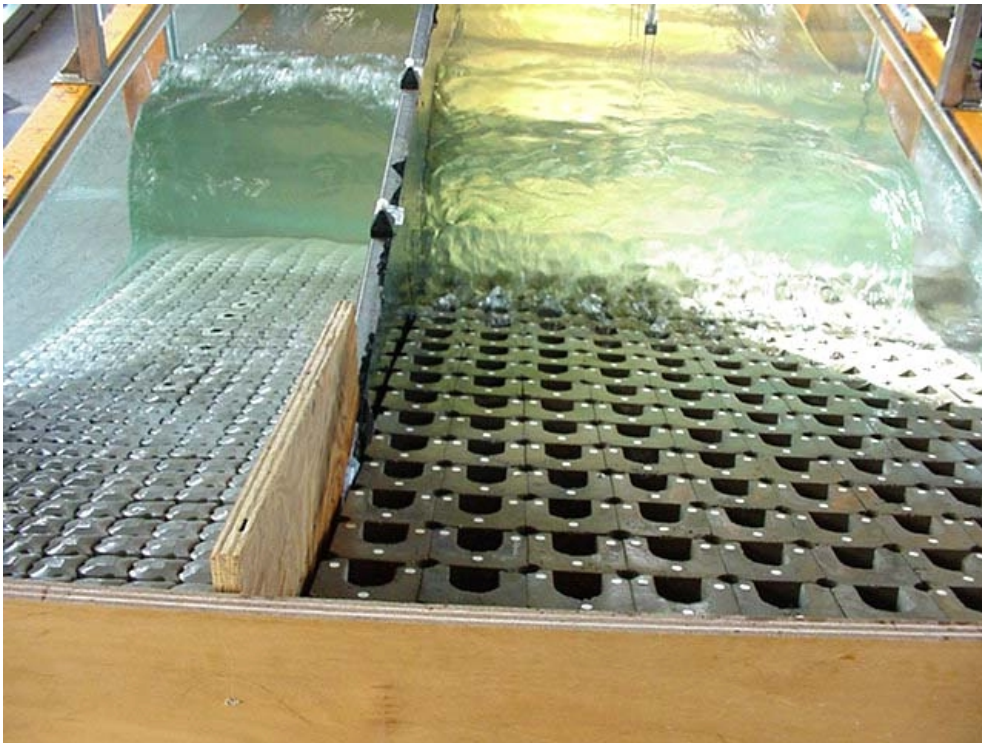


Abb.50: Sturzbrecher auf quasi glatter Böschung links; *partieller* Sturzbrecher (collapsing breaker) auf der durchströmten Böschung rechts.



Abb.51: Wellenauflauf an glatter Böschung links höher als an der durchströmten Böschung rechts



Abb.52: Ansiedlung von Wasserpflanzen an einer Versuchsböschung eines Binnengewässers.



Abb.53: Wasserpflanzen an einer Versuchsböschung unter Wasser.

Fachhochschule Bielefeld

Labor für Hydromechanik und Wasserbau

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Artilleriestr. 09 D - 32427 Minden



Erfolgskontrollbericht Forschungsprojekt

“Bemessung wellenbelasteter Hohldeckwerke“

- BMBF - Förderkennzeichen: 1701098 -

August 2001

Förderer:**Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie**

Vorhabenbezeichnung:

“Bemessungsgrundlagen wellenbelasteter Hohldeckwerke“

Zuordnung zum FuE-Programm: Programm zur Förderung anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung an Fachhochschulen (aFuE). FKZ: 1701098

Antragsteller:

Fachhochschule Bielefeld

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Bewilligungszeitraum: 01.09.1998 bis zum 29.02.2000

Projektende: 30.04.2000

Bewilligte Zuwendung als nicht rückzahlbarer Zuschuss DM 199.951,00; davon in Anspruch genommen: DM 197.121,69

Drittmittel: Keine

Kooperationspartner: GreenBanks v.o.f. Erosion Control Systems, NL-2957 ZG Nieuw-Lekkerland; The Netherlands

Bezug: Vorausgegangener Zwischenbericht zum 30.04.1999

Die für die Durchführung der Untersuchungen veranschlagte Dauer von 18 Monaten hat sich in mehrfacher Hinsicht als zu kurz bemessen herausgestellt. Das vorgesehene Arbeitsprogramm konnte in diesem Zeitraum nur zu etwa 2/3 bewältigt werden.

Gründe: Einerseits musste das benutzte Gerät (Wellenkanal) auch im Rahmen von Lehrveranstaltungen zur Verfügung stehen; andererseits erfordert ein zeitlich derart auf die Projektlaufzeit (18 Monate) befristetes Arbeitsverhältnis für den betreffenden Stelleninhaber (wiss. Mitarbeiter) ständige Nebenaktivitäten zur Sicherung eines *künftigen* Arbeitsplatzes.

Das Ziel konnte dennoch ohne zusätzliche Förderung bis Mitte 2001 durch Eigenleistungen der Hochschule vollständig erreicht werden, da die Untersuchungen nach dem nominellen Projektende u.a. mit Unterstützung von Diplomanden intermittierend fortgeführt wurden.

Ergebnis:

Diese als Vorlaufprogramm durchgeführten Modelluntersuchungen lassen darauf schließen, dass wellenbelastete - unter Verwendung sog. Hollow Cubes hergestellte - Böschungsbauwerke auch für sehr steile Böschungen bis zu einer Neigung von etwa $1:n = 1:1,5$ Stabilität aufweisen.

Damit können die Voraussetzungen für die künftige Untersuchung der Stabilität naturgroßer Bauwerke - etwa im „großen Wellenkanal“ des Forschungszentrums Küste (FZK) Hannover – als hinreichend erfüllt gelten.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Dießelhorststr. 01

38116 Braunschweig

e-Mail: buesching@hollow-cubes.de